



VI Seminário Internacional sobre Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos - SIREE 2023

ANAIS

E-BOOK

DIVULGAÇÃO:

<https://www.gov.br/cetem/pt-br/central-de-conteudos/eventos/SIREE>

<https://www.youtube.com/@cetem-centrodetecnologiami348/featured>

<http://mineralis.cetem.gov.br/>

9 a 11 de outubro 2023
Rio de Janeiro, Brasil

ANAIS DO VI SIREE

9 a 11 de outubro de 2023
Rio de Janeiro, Brasil

COMISSÃO ORGANIZADORA

Lúcia Helena Xavier, D.Sc - Pesquisadora CETEM/MCTI
Emmanuelle Freitas, D.Sc. - Pesquisadora CETEM/MCTI
Carlos Alberto Moraes, DSc. - Professor Titular I -
UNISINOS/PORTO ALEGRE
Feliciano Andrade Brehm, DSc - Professora Adjunta
UNISINOS/PORTO ALEGRE

COMISSÃO CIENTÍFICA

DS.c. Luciana Contador
M.Sc. Luciana Mofati

Avaliadores

DS.c. Eduardo Antônio Maia Lins - UFPE
DS.c. Mônica Calderari - UERJ
DS.c. Daniel Majuste - UFMG
DS.c. Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco - UFRJ
DS.c. Thiago Araújo Simões - UFRPE
DS.c. Hugo Marcelo Veit - UFRGS
DS.c. Amaro Pereira - COPPE/UFRJ
DS.c. Luciana Contador- R3MINARE
DS.c. Emmanuelle Freitas - CETEM
DS.c. Lúcia Helena Xavier - CETEM



APRESENTAÇÕES ORAIS

Segunda-feira, dia 09 de outubro de 2023 – Sala Dias Leite

HORÁRIO	SALA 1
16:00	Avaliação do funcionamento e intensidade luminosa de lâmpadas recebidas para reciclagem em cooperativas de coleta seletiva da cidade de Porto Alegre Josimar Souza Rosa; Emanuele Caroline Araújo dos Santos; William Fernandes; Feliciane Andrade Brehm; Carlos Alberto Mendes Moraes
16:15	Depósitos antropogênicos: recuperação de recurso secundário a partir de ímãs de neodímioferro-boro (NdFeB) Franciele Rossetti Cúnico; Jéssica Prats Raspini ; Gisele de Lorena Diniz Chaves; Lucila Maria de Souza Campos ; Orestes Estevam Alarcon
16:30	Gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos na rede federal de ensino: estudo de caso no CEFET/RJ Aline Guimarães Monteiro Trigo; José Aires Trigo; Thiago Santos Ramalho; Úrsula Maruyama
16:45	Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos como fonte secundária de materiais críticos e estratégicos Marcelo Pilotto Cenci; Priscila Silva Silveira; Felipe Antônio Lucca Sánchez; Andréa Moura Bernardes; Hugo Marcelo Veit

Segunda-feira, dia 09 de outubro de 2023 – Sala Trajano

HORÁRIO	SALA 2
16:00	Desmontagem e processamento mecânico de baterias automotivas de lítio ferro fosfato (LFP) pós uso para obtenção de frações concentradas em lítio Sánchez F.A.L., Lacava P; Endres S.M.E.; Trojaner M.R.; Veit H.M.
16:15	Estudo da separação de leds de módulos oriundos de uma unidade de triagem de Porto Alegre Emanuele Caroline Araujo dos Santos; Aline Deitos; Daiane Calheiro Evaldt; Feliciane Andrade Brehm; Carlos Alberto Mendes Moraes
16:30	Política pública para a economia circular: uma avaliação do programa Sukatech Valquíria Duarte Vieira Rodrigues; Fabricio Alves Freitas; Guilherme Resende Oliveira; Thiago Angelino Martins da Silva
16:45	Organizações de catadores e logística reversa de REEE: obstáculos para a integração Lorena Miossi Alves Cabral, Luciana Harue Yamane, Renato Ribeiro Siman





Terça-feira, dia 10 de outubro de 2023 – Sala Dias Leite

HORÁRIO	SALA 1
15:15	Panorama da gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na bacia Tietê-Jacaré Cleyse Kelly Barbosa Nunes; Júlia Fonseca Colombo Andrade; Valdir Schalch
15:30	Estudo dos métodos para recuperação do neodímio de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos Agnes Mitzi Kich; Milena Mattje Barcelos; Regina Celia Espinosa Modolo; Carlos Alberto Mendes Moraes; Feliciane Andrade Brehm
15:45	Logística reversa dos eletroeletrônicos: uma avaliação do ciclo de vida da fase de transporte Bruna Guedes Cessel; Isadora Marcela de Campos; Thamires Martinho Prados; Giancarlo A. Lovón-Canchumani
16:00	Os gargalos da cadeia de revalorização de resíduos eletroeletrônicos no Brasil Raphael Salviano; Patrícia Guarnieri

Terça-feira, dia 10 de outubro de 2023 – Sala Trajano

HORÁRIO	SALA 2
15:15	Caracterização tecnológica dos componentes químicos das memórias RAM Aline Arruda Barreto; Iure Borges De Moura Aquino; Wladymyr Jefferson Bacalhau De Sousa
15:30	Potencial de recuperação de metais a partir de PCI: um estudo de caso no município de Caruaru-PE Ana Paula dos Santos Silva; José Francisco de Oliveira Neto; Maisa Mendonça Silva; Lourdinha Florencio; Simone Machado Santos
15:45	Resíduos eletroeletrônicos de origem governamental no Brasil: diagnóstico de geração e manejo Roger Trancozo de Jesus; Luciana Harue Yamane; Renato Ribeiro Siman





APRESENTAÇÕES EM PÔSTER

Exposição e avaliação, dias 9 e 10 de outubro de 2023, das 17h às 18h – Hall principal

PÔSTER

Análise amostral sobre o descarte de resíduos eletroeletrônicos em Campina Grande – PB

Lima, H. F.; Barreto, A. A.; Aquino, I. B. M.

Circularidade da cadeia de equipamentos eletrônicos: desafios e ações para sua consolidação

Marcia Cristina Machado; Tereza Cristina Melo de Brito Carvalho

Nanomateriais em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos: impactos à saúde e ao ambiente

Cristina Lúcia Silveira Sisinno; Andrea Camardella de Lima Rizzo; Cláudia Duarte da Cunha

Orçamento empresarial aplicado a logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

Lisiane Kleinkauf da Rocha; Thiago Dal Prá Silva; Carlos Alberto Mendes Moraes

Opções de circularidade de painéis fotovoltaicos ao fim da vida útil

Érika Tavares Marques; Uedja Tatyane G. M. Lima; Maria do Carmo Sobral

Metodologia de metarreciclagem e inclusão digital no projeto um computador nota 10

Augusto Queiroz de Macedo; Cibelly Maria Araujo Leite; Rafael Ribeiro Moraes; Luiza Eugenia da Mota Rocha Cirne; Gilberlando Gomes da Silva

Efficient metal recycling – the most important step towards a circular economy for non-ferrous metals

Fabio Tassis; Rolf Degel; Markus Reuter; Nikolaus Borowski

Mapeamento sistemático da recuperação e caracterização de metais em smartphones pós-consumo

Aline Deitos; Emanuele Caroline Araujo dos Santos; Regina Célia Espinosa Modolo; Feliciane Andrade Brehm; Carlos Alberto Mendes Moraes

Extraction of gold by intensive cyanidation and bio-extraction of base metals from electronic scrap - a semipilot scale experience

Sobral, L. G. S., De Oliveira, A. D. N.; De Miranda, A. G. T. N.; Bello, A.L.C, Cunha, C.R. Wisniewski

Processamento mecânico e lixiviantes químicos na recuperação de elementos valiosos de baterias de íon-lítio

Deyber Alexander Ramirez Quintero; Marcos Batista Cotovia Pimentel; Sebastiao Eleuterio Filho; Carlos Roberto Mendes de Oliveira

Lithium Extraction from Lithium-ion Batteries: Pyro and Hydrometallurgical approaches

Sobral, L. G. S., Viana Junior, I, Oliveira, A. D. N., Batista, M. M., Wisniewski, C. R.





SUMÁRIO

ANÁLISE AMOSTRAL SOBRE O DESCARTE DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM CAMPINA GRANDE – PB	06
AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E INTENSIDADE LUMINOSA DE LÂMPADAS RECEBIDAS PARA RECICLAGEM EM COOPERATIVAS DE COLETA SELETIVA DA CIDADE DE PORTO ALEGRE	18
CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS COMPONENTES QUÍMICOS DAS MEMÓRIAS RAM	30
CIRCULARIDADE DA CADEIA DE EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS: DESAFIOS E AÇÕES PARA SUA CONSOLIDAÇÃO	41
DEPÓSITOS ANTROPOGÊNICOS: RECUPERAÇÃO DE RECURSO SECUNDÁRIO A PARTIR DE ÍMÃS DE Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB)	53
DESMONTAGEM E PROCESSAMENTO MECÂNICO DE BATERIAS AUTOMOTIVAS DE LÍTIO FERRO FOSFATO (LFP) PÓS USO PARA OBTENÇÃO DE FRAÇÕES CONCENTRADAS EM LÍTIO	65
ESTUDO DA SEPARAÇÃO DE LEDS DE MÓDULOS ORIUNDOS DE UMA UNIDADE DE TRIAGEM DE PORTO ALEGRE	77
ESTUDO DOS MÉTODOS PARA RECUPERAÇÃO DO NEODÍMIO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS	89
EXTRACTION OF GOLD BY INTENSIVE CYANIDATION AND BIO-EXTRACTION OF BASE METALS FROM ELECTRONIC SCRAP - A SEMIPILOT SCALE EXPERIENCE	102
GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NA REDE FEDERAL DE ENSINO: ESTUDO DE CASO NO CEFET/RJ	112
LITHIUM EXTRACTION FROM LITHIUM-ION BATTERIES: PYRO AND HYDROMETALLURGICAL APPROACHES	124
LOGÍSTICA REVERSA DOS ELETROELETRÔNICOS: UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FASE DE TRANSPORTE	131
MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA RECUPERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE METAIS EM SMARTPHONES PÓS CONSUMO	143
METODOLOGIA DE METARRECICLAGEM E INCLUSÃO DIGITAL NO PROJETO UM COMPUTADOR NOTA 10	155



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE	162
OPÇÕES DE CIRCULARIDADE DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS AO FIM DA VIDA ÚTIL	174
ORÇAMENTO EMPRESARIAL APLICADO A LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS	185
ORGANIZAÇÕES DE CATADORES E LOGÍSTICA REVERSA DE REEE: OBSTÁCULOS PARA A INTEGRAÇÃO	195
OS GARGALOS DA CADEIA DE REVALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL	207
PANORAMA DA GESTÃO DOS RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NA BACIA TIETÊ-JACARÉ (SP)	219
POLÍTICA PÚBLICA PARA A ECONOMIA CIRCULAR: uma avaliação do Programa Sukatech	231
POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DE PCI: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE CARUARU-PE	243
PROCESSAMENTO MECÂNICO E LIXIVIANTES QUÍMICOS NA RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS VALIOSOS DE BATERIAS DE LÍTIO	253
RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS COMO FONTE SECUNDÁRIA DE MATERIAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS	265
RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS DE ORIGEM GOVERNAMENTAL NO BRASIL: DIAGNÓSTICO DE GERAÇÃO E MANEJO COM BASE NO ESTUDO DE CASO DO ESPÍRITO SANTO	277



ANÁLISE AMOSTRAL SOBRE O DESCARTE DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM CAMPINA GRANDE – PB

LIMA, H. F. ^{1*}; BARRETO, A.A ²; AQUINO, I. B. M. ³

¹ Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia.

² Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral.

³ Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia.

* hiagofarias_@hotmail.com.

Resumo

O “problema” gerado pelos Resíduos Eletroeletrônicos na sociedade contemporânea requer uma solução imediata devido à falta de conhecimento sobre a destinação adequada desses resíduos, o que acarreta prejuízos ao meio ambiente e à economia. O aumento global dos REEE é um reflexo da falta de consciência da sociedade em relação ao descarte correto. No Brasil, ao longo dos anos, foram discutidas diversas políticas relacionadas à reciclagem, mas somente em agosto de 2010 foi promulgada a Lei Federal nº 12.305/2010, conhecida como Política Nacional dos Resíduos Sólidos, seguida pelos Decretos nº 10.240 de 2020 e nº 10.936 de 2022, que estabelecem diretrizes para a implementação de um sistema de logística reversa. Neste contexto, a preocupação central deste artigo foi analisar a população de Campina Grande – PB questionando sobre o entendimento do tema Resíduos Eletroeletrônicos e o nível de conscientização, de um modo geral, em relação a necessidade de reciclagem dos REEE.

Palavras-chave: Resíduos Eletroeletrônicos; Logística Reversa; Análise Amostral.

1. Introdução

A problemática dos Resíduos Eletroeletrônicos é uma preocupação crescente na sociedade contemporânea devido ao rápido avanço da tecnologia e ao consequente aumento da obsolescência de equipamentos eletrônicos. Essa evolução tecnológica tem trazido inúmeras vantagens em termos de conectividade, eficiência e facilidade de uso, o que leva cada vez mais pessoas a buscarem novos dispositivos eletrônicos para atender suas necessidades (SANTOS, 2016; SANTANA; MARQUES, 2017).

No entanto, o lado negativo desse progresso é a geração massiva de resíduos eletroeletrônicos. Estima-se que esse tipo de resíduo seja um dos de crescimento mais rápido no mundo, tornando-se um desafio ambiental e econômico significativo. A falta de conhecimento sobre a destinação correta desses resíduos e a ausência de uma cultura



de reciclagem adequada contribuem para agravar essa situação (BALDÉ *et al.*, 2017, NASCIMENTO *et al.*, 2018; LOURENÇO, 2019).

No Brasil, várias políticas e regulamentações foram discutidas ao longo dos anos para enfrentar o desafio dos REEE. A implementação da Lei Federal nº 12.305/2010, conhecida como Política Nacional dos Resíduos Sólidos, trouxe diretrizes e instrumentos para promover a gestão adequada desses resíduos. Além disso, os Decretos nº 10.240 de 2020 e nº 10.936 de 2022, estabelecem normativas para a implementação da logística reversa, responsabilizando os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de eletroeletrônicos pela coleta e destinação adequada desses produtos (GOMES *et al.*, 2014; FERREIRA, 2020; XAVIER *et al.*, 2023).

No entanto, apesar das regulamentações existentes, o descarte inadequado de resíduos eletroeletrônicos ainda é um problema persistente. Muitas pessoas não têm conhecimento sobre os riscos ambientais e de saúde associados ao descarte incorreto, e a falta de infraestrutura adequada para a coleta e reciclagem também contribui para a (MAIELLO *et al.*, 2018; LOURENÇO, 2019).

Nesse contexto, a conscientização da população é fundamental. Campanhas de educação ambiental, programas de coleta seletiva e a promoção da responsabilidade compartilhada entre fabricantes, consumidores e poder público são medidas essenciais para mitigar os impactos dos REEE. Além disso, a implementação eficaz da logística reversa, com a criação de mais pontos de coleta e estruturas de reciclagem adequadas, para garantir a destinação correta dos resíduos eletrônicos e promover a economia circular (BALDÉ *et al.*, 2017; XAVIER *et al.*, 2023).

A reciclagem de dos REEE também apresentam benefícios significativos. Muitos equipamentos eletrônicos contêm metais preciosos e materiais valiosos que podem ser recuperados por meio de processos de reciclagem adequados. Isso não só reduz a necessidade de extração de novas matérias-primas, mas também diminui a pressão sobre o meio ambiente e contribui para a economia sustentável (XAVIER *et al.*, 2021).

Em suma, segundo Ferreira (2020), a problemática dos Resíduos Eletroeletrônicos requer ações urgentes e coordenadas de diversos setores da sociedade. A conscientização da população, a implementação eficaz da logística reversa e o investimento em infraestrutura de reciclagem são elementos essenciais para lidar com esse desafio e garantir a sustentabilidade ambiental e econômica.

O presente artigo tem como objetivo principal verificar o grau de conhecimento e conscientização da população amostral em relação a problemática dos Resíduos Eletroeletrônicos na cidade de Campina Grande, localizada no interior do estado da Paraíba. E para isso, foi realizada uma pesquisa utilizando um questionário eletrônico, referente aos conceitos e ações envolvendo os REEE.

2. Metodologia

Para realização desse estudo, fez-se, inicialmente, uma revisão bibliográfica sobre as leis vigentes no país, os conceitos dos REEE e de logística reversa. Como base nas referências teóricas, elaborou-se um questionário eletrônico para obtenção dos dados primários.

O questionário eletrônico foi composto por seis questões, como observada na Figura 1, sendo elas duas de múltiplas escolhas e quatro com respostas únicas. Estas



questões abordaram temas relacionados ao descarte dos seus Resíduos Eletroeletrônicos, renovação dos equipamentos eletrônicos, destinação dos seus equipamentos, e também, sobre o conhecimento acerca dos materiais com valor agregado que possivelmente são perdidos no descarte.

Google Formulários

Público - 200 pessoas

PERGUNTAS
1. Sobre seus equipamentos eletrônicos que estão inutilizados (Ex.: Celulares, smartphones, computadores, notebooks, tablets, entre outros).
2. Quanto a renovação dos seus equipamentos eletrônicos (com qual frequência você compra novos equipamentos),
3. O que você costuma descartar?
4. Qual a destinação desses equipamentos?
5. Você reconhece o valor agregado dos eletrônicos que não são mais utilizados (que apesar de inutilizados, esse lixo eletrônico ainda tem valor financeiro)?
6. Você encaminha os seus eletrônicos inutilizados para terceiros?

Figura 1 – Perguntas do questionário eletrônico sobre Resíduos Eletroeletrônicos.

Fonte: AUTORES, 2022.

Ao longo de trinta dias, prazo vigente estipulado para a pesquisa, e foi alcançado um número de 200 participantes, levando em consideração a população de Campina Grande no estado da Paraíba, que se estima ser em torno de 413.830 pessoas, observou-se uma margem de erro em torno de 6% e um grau de confiabilidade em torno de 90% para o presente artigo.

Uma amostra composta por apenas 200 participantes em uma população total de 413.830 pessoas, com uma margem de erro de 6% e um grau de confiabilidade de 90%, pode não ser completamente representativa da população, especialmente quando se busca obter conclusões precisas e abrangentes que englobem toda a população. A limitada representatividade pode ser atribuída, em parte, à adesão limitada das pessoas para responder ao questionário.

Apesar dessa limitação na representatividade, a pesquisa ainda fornece um panorama inicial do nível de conscientização da população em relação ao descarte de resíduos eletroeletrônicos em Campina Grande, Paraíba. É importante ressaltar que a adesão restrita à pesquisa pode ser influenciada por diversos fatores, como disponibilidade de tempo e interesse dos participantes.

Em síntese, embora a representatividade possa ser afetada pela baixa adesão à pesquisa, este estudo oferece um insight preliminar sobre a conscientização da população em relação ao descarte de resíduos eletroeletrônicos na região de Campina Grande, na Paraíba.

3. Resultados e Discussões

A rápida evolução tecnológica tem levado a uma crescente substituição de equipamentos eletroeletrônicos por modelos mais modernos e avançados. Existem dois principais motivos que impulsionam essa troca. O primeiro é a obsolescência tecnológica, onde os dispositivos mais antigos se tornam ultrapassados em relação às novas opções disponíveis no mercado. Os avanços constantes em termos de recursos, desempenho e funcionalidades fazem com que muitas pessoas optem por adquirir os modelos mais recentes para se manterem atualizadas (CASTRO *et al.*, 2020).



O segundo motivo é a completa inutilização dos equipamentos. Isso pode ocorrer devido a diversas razões, como falhas ou defeitos irreparáveis, danos físicos, falta de compatibilidade com novos sistemas ou simplesmente uma decisão pessoal de substituição por um dispositivo mais moderno (NASCIMENTO *et al.*, 2018; CASTRO *et al.*, 2020).

No entanto, o descarte desses equipamentos muitas vezes é feito de forma irregular. Em vez de serem devidamente encaminhados para a reciclagem ou tratamento adequado, eles são descartados em lixões, aterros sanitários ou até mesmo jogados no lixo comum. Isso pode ocorrer devido à falta de conhecimento sobre as opções corretas de descarte, falta de acesso a pontos de coleta de resíduos eletrônicos ou simplesmente negligência por parte dos usuários (PEREIRA, 2018; XAVIER *et al.*, 2023).

De acordo com o estudo em questão, as principais ações relacionadas aos equipamentos eletroeletrônicos que foram substituídos por novos dispositivos são as seguintes: cerca de 45,5% desses equipamentos ainda são passíveis de conserto,



Indicando que poderiam ser utilizados por mais tempo com uma devida manutenção; aproximadamente 35,5% dos equipamentos foram descartados por estarem completamente inutilizados; por fim, 27,5% dos equipamentos foram considerados defasados tecnologicamente e foram descartados por essa razão. Como apresentado na Figura 2.

1. Sobre seus equipamentos eletrônicos que estão inutilizados (Ex.: Celulares, smartphones, computadores, notebooks, tablets, entre outros):
200 respostas

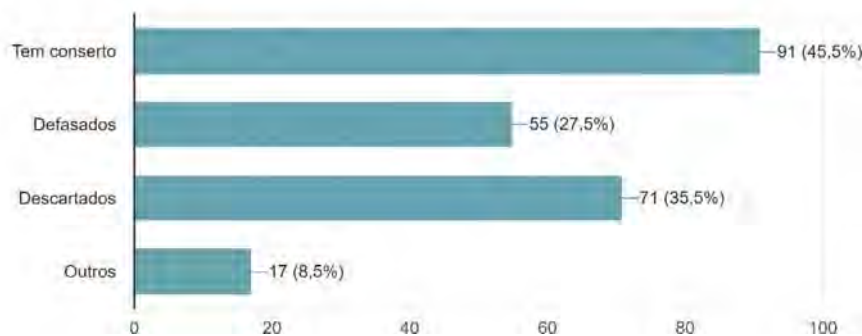


Figura 2 – Destinação dos equipamentos inutilizados.

Fonte: AUTORES, 2022.

Por consumismo e/ou influência, muitas pessoas desejam ter os dispositivos mais modernos e avançados para se destacarem socialmente, exibirem certo *status* e/ou acompanharem as últimas tendências. A posse de produtos tecnológicos de ponta pode ser vista como um símbolo de prestígio e sofisticação. Esse consumismo por novas tecnologias podem levar ao consumo excessivo e à substituição frequente de equipamentos eletrônicos, mesmo que os dispositivos antigos ainda estejam funcionando adequadamente (SANTANA *et al.*, 2020).

Por outro lado, a necessidade também é um fator importante, na qual, as constantes inovações tecnológicas oferecem benefícios práticos e funcionais que podem atender a necessidades específicas das pessoas. Por exemplo, a evolução dos *smartphones* permitiu o acesso fácil à internet, comunicação instantânea, armazenamento de informações pessoais, entre outros recursos úteis. Para muitos, esses avanços tecnológicos são essenciais para o trabalho, estudos, comunicação, entretenimento e até mesmo para a segurança pessoal (SANTOS, 2016; SANTANA; MARQUES, 2017).

É fundamental considerar a sustentabilidade e os impactos ambientais causados pelo descarte frequente de dispositivos eletrônicos. A conscientização sobre a importância da reciclagem, do uso responsável dos recursos naturais e da busca por soluções mais duradouras e sustentáveis é fundamental para promover uma abordagem mais equilibrada em relação ao consumo e à adoção de novas tecnologias (LOURENÇO, 2019; CASTRO *et al.*, 2020). E quanto à periodicidade em que há renovação dos equipamentos eletrônicos, a Figura 3 mostra as respostas dos entrevistados.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

2. Quanto a renovação dos seus equipamentos eletrônicos (com qual frequência você compra novos equipamentos):

200 respostas

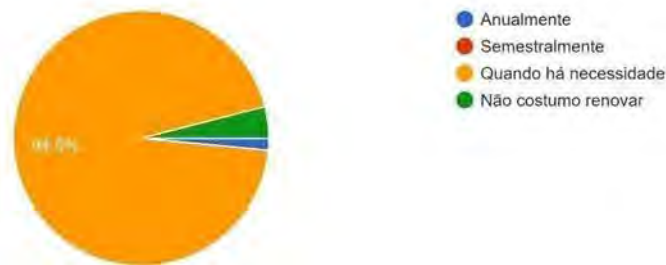


Figura 3 – Periodicidade em que é feita a renovação dos equipamentos eletrônicos.

Fonte: AUTORES, 2022.

Nessa questão, cerca de 94,5%, que se refere a 189 pessoas, tendem a renovar seus equipamentos eletrônicos quando a necessidade. E nesse questionário apenas 3 pessoas marcaram que fazem a renovação anual dos seus equipamentos e 8 pessoas informaram que não costumam renovar os mesmos.

O descarte irregular de equipamentos eletroeletrônicos, segundo Cunha *et al.* (2015), podem trazer graves consequências ambientais e de saúde pública. Já que esses dispositivos contêm materiais tóxicos, como metais pesados e produtos químicos perigosos, que podem contaminar o solo, a água e o ar quando descartados de forma inadequada. Além disso, o desperdício de recursos naturais valiosos, como metais preciosos, também é um problema associado ao descarte incorreto. Os principais equipamentos descartados pelos entrevistados estão ilustrados na Figura 4.

3. O que você costuma descartar?

200 respostas

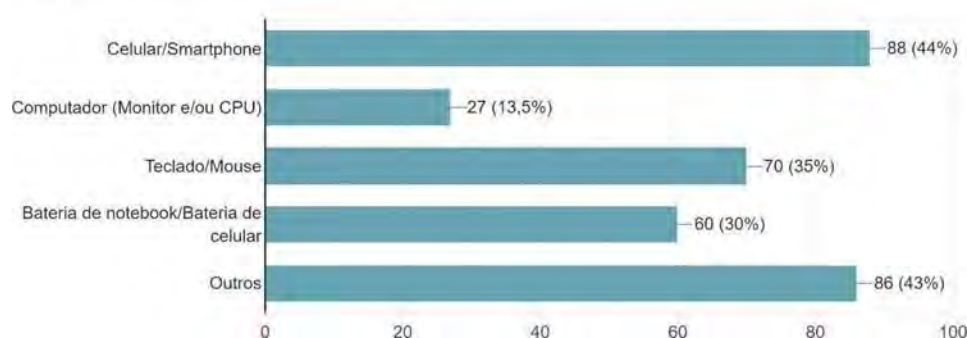


Figura 4 – Principais equipamentos descartados.

Fonte: AUTORES, 2022.

Os celulares/*smartphones* são os equipamentos mais descartados segundo a pesquisa aplicada aos moradores de Campina Grande – PB, seguidos por outros equipamentos que não estão citados no questionário. Já os equipamentos menos



descartados são os computadores, que são os monitores e/ou gabinetes (CPU), que apresentaram apenas 13,5%, referente a 27 pessoas.

É fundamental a conscientização das pessoas sobre a importância do descarte correto de equipamentos eletroeletrônicos para que entendam os impactos negativos gerados pelo descarte inadequado e assim, sejam incentivadas a adotar práticas responsáveis de descarte. Isso inclui a divulgação de informações sobre pontos de coleta e empresas especializadas em reciclagem, assim como a aplicação de políticas públicas que incentivam e facilitam a logística reversa (CASTRO *et al.*, 2020).

Além disso, é fundamental que as empresas e os governos desempenhem um papel ativo na conscientização. As empresas podem educar seus clientes sobre as práticas corretas de descarte e promover programas de reciclagem de produtos eletroeletrônicos. Os governos locais podem implementar regulamentações e políticas que incentivem a reciclagem, estabelecendo sistemas de logística reversa e fornecendo infraestrutura adequada para o descarte seguro dos equipamentos eletroeletrônicos, aplicando a Lei 12.305 de 2010 e os decretos 10.240 de 2020 e 10.936 de 2022 que se encontram em vigor (GOMES *et al.*, 2014; REIS *et al.*, 2017; BRASIL, 2020; BRASIL, 2022).

E a conscientização também pode ser promovida por meio de parcerias entre organizações governamentais, empresas, instituições de ensino e organizações não governamentais. Essas parcerias podem realizar eventos de recolhimento de eletrônicos, promover *workshops* educativos e fornecer recursos informativos para a comunidade. Pois adotar uma abordagem consciente, pode-se reduzir o impacto ambiental gerado pelos REEE, além de conservar os recursos naturais finitos, além de contribuir para um futuro mais sustentável (XAVIER *et al.*, 2021). E a Figura 5 mostra a porcentagem das respostas dadas pelos entrevistados para cada alternativa.

4. Qual a destinação desses equipamentos?
200 respostas

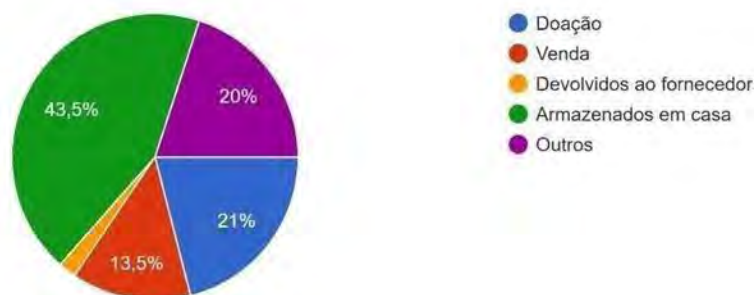


Figura 5 – Destinação dos equipamentos substituídos.
Fonte: AUTORES, 2022.

Na análise dessa questão, foi observado que aproximadamente 43,5% (87 moradores de Campina Grande – PB) tendem a armazenar em casa seus equipamentos eletrônicos. Em seguida, cerca de 21% (42 pessoas) optam por fazer doações dos seus equipamentos. Outros 20% escolhem uma destinação diferente daquelas mencionadas no questionário. Cerca de 13,5% preferem vender seus equipamentos eletrônicos, enquanto 2% (4 pessoas) praticam a Logística Reversa, devolvendo os equipamentos ao fornecedor.



Os equipamentos eletroeletrônicos possuem a presença de materiais de valor agregado, como ouro, estanho, prata, cobre, entre outros, assim como outros materiais com possibilidades de reuso, já que a maioria dos REEE pode ser reciclada e reutilizada (NICOLAI, 2016).

A Mineração Urbana é uma técnica crescente que busca recuperar materiais valiosos a partir de resíduos pós-consumo, incluindo REEE. A reciclagem de REEE pode ajudar a preservar os recursos naturais, reduzir a poluição do ar e da água, e diminuir a quantidade de resíduos que precisam ser armazenados em aterros sanitários. Além de gerar novos empregos em setores como a reciclagem, a reutilização, a logística e o transporte, podendo criar também mercados para os materiais recuperados, que geram impactos positivos na economia (PEREIRA, 2018; XAVIER *et al.*, 2023).

Foi questionado aos entrevistados se eles reconheciam o valor agregado nos equipamentos eletrônicos não utilizados, e a Figura 6 revela a quantidade de entrevistados que reconhecem o valor agregado dos eletroeletrônicos.

5. Você reconhece o valor agregado dos eletrônicos que não são mais utilizados (que apesar de inutilizados, esse lixo eletrônico ainda tem valor financeiro)?
200 respostas

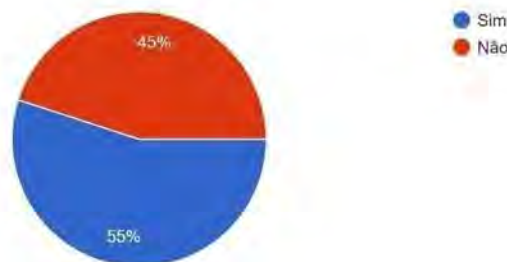


Figura 6 – Entrevistados que reconhecem o valor agregado dos Eletroeletrônicos.

Fonte: AUTORES, 2022.

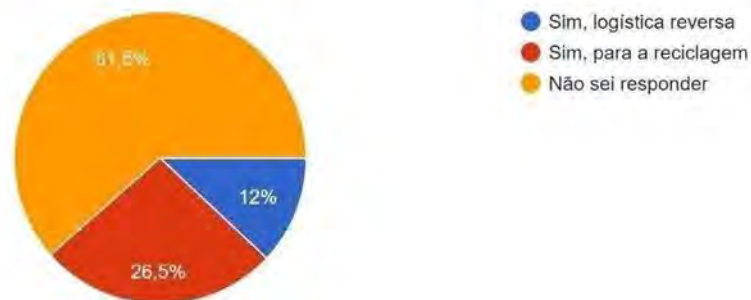
Foi observado que aproximadamente 55% das pessoas, o equivalente a 110 indivíduos moradores de Campina Grande – PB, reconhecem o valor agregado nos Resíduos Eletroeletrônicos que não são mais utilizados. Por outro lado, cerca de 45%, aproximadamente 90 pessoas, desconhecem a existência desse valor agregado.

Por fim, o último ponto abordado, foi referente a destinação dos equipamentos eletrônicos em desuso para pontos de reciclagem ou de coleta de logística reversa, que segundo a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, é um procedimento que viabiliza a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010). A Figura 7 mostra o encaminhamento dos eletroeletrônicos inutilizados.



6. Você encaminha os seus eletrônicos inutilizados para terceiros?

200 respostas

**Figura 7** – Destinação dos eletrônicos inutilizados para terceiros.**Fonte:** AUTORES, 2022.

Na análise dessa questão, foi observado que aproximadamente 61,5% (123 pessoas) não souberam responder a pergunta. Em seguida, cerca de 26,5% (53 pessoas) afirmaram que encaminham seus equipamentos para reciclagem e apenas 12% (24 pessoas) praticam a Logística Reversa, devolvendo os equipamentos ao fornecedor.

Com isso, nota-se que a logística reversa, que é um processo que engloba o retorno dos resíduos sólidos do consumidor ao fabricante, visando à reutilização, reciclagem ou destinação adequada do ponto de vista ambiental, não é uma prática conhecida pela população de Campina Grande – PB (MAIELLO, *et al.*, 2018).

Segundo Nascimento *et al.* (2018), a logística reversa é uma estratégia essencial para lidar com os resíduos sólidos, permitindo o retorno dos materiais descartados ao ciclo produtivo de forma ambientalmente responsável. É uma prática que busca conciliar as necessidades da sociedade em termos de consumo e descarte com a preservação dos recursos naturais e a redução dos impactos ambientais.

4. Considerações Finais

A conscientização e o engajamento da sociedade em um todo, são essenciais para garantir que os equipamentos eletroeletrônicos sejam descartados de forma responsável, contribuindo para a preservação do meio ambiente, a redução do desperdício de recursos naturais e a promoção de uma economia circular sustentável (BARRETO; BARATA, 2018; VILELA, 2020).

A taxa de adesão ao preenchimento do questionário foi baixa, mesmo com grande divulgação interna e externa a Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, *campus* SEDE. E essa baixa adesão é um reflexo do desinteresse e falta de conhecimento sobre o tema, já que o descarte adequado dos resíduos eletroeletrônicos não é uma prática comum da população de Campina Grande – PB, por não haver uma divulgação dos pontos de coleta existentes, assim como não ter um guia de como descartar corretamente os seus REEE.

É relevante mencionar que a representatividade da pesquisa foi afetada pela baixa adesão à resposta dos questionários. Com apenas 200 participantes em relação a uma população de 413.830 pessoas, a amostra pode ser considerada limitada. No entanto, mesmo com essa limitação, os resultados ainda oferecem insights valiosos sobre a conscientização da população em relação aos REEE.



Entretanto, os resultados obtidos foram satisfatórios, revelando a falta de conhecimento aprofundado e adequado sobre os REEE produzidos por cada cidadão. Isto só reforça a necessidade urgente da adoção de medidas de informação e conscientização para gestão dos resíduos eletroeletrônicos por parte dos Agentes Públicos, das Instituições Públicas e Privadas assim como da sociedade em um todo.

Referências

BALDÉ *et al.* **The Global E-waste Monitor**, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.

BARRETO, F. E., BARATA, A. J. S. S. **LIXO ELETRÔNICO: Uma análise do descarte nas organizações privadas do Município de São Gabriel, Rio Grande do Sul.** Revista Educação em Ação, edição nº 62. Publicado em: 26/01/2018. Acesso em: 20 ago. 2022.

BRASIL, **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** LINK: https://www.paranaambiental.com.br/arquivos/files/5_residuos_leifederal.pdf. Acesso em: 05 out. 2022.

BRASIL, **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020.** LINK: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>. Acesso em: 05 out. 2022.

BRASIL, **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022.** LINK: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10936.htm. Acesso em: 02 fev. 2023.

CASTRO *et al.*, **O descarte do Lixo Eletrônico e seus impactos ambientais.** Revista Acadêmica, Ano 7, n.27, julho-setembro de 2020. Faculdade de Tecnologia Oswaldo Cruz, 2020. ISSN 2357-8173 (versão on-line).

CUNHA *et al.*, **Análise da aplicabilidade da lei 12.305/2010 na gestão dos resíduos sólidos urbanos no município de Rio das Ostras, RJ–Brasil.** Universidade Federal do Rio de Janeiro; 2. Instituto de Biologia – Ilha do Fundão (Brasil). Revista Ambientalmente *Sustentable*, 2015, ano X, vol. II, núm. 20, páginas 1653-1668.

FERREIRA, M. M., **Decreto 10.240.** LINK: <http://plone.ufpb.br/tree/contents/noticias/decreto-10.240>. Publicado em 17/05/2020, João Pessoa - Universidade Federal de João Pessoa. Acesso em: 16 nov. 2022.

GOMES *et al.*, **POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS: perspectivas de cumprimento da Lei 12.305/2010 nos municípios brasileiros, municípios paulistas e municípios da região do ABC.** Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria, vol. 7, novembro de 2014, pp. 93- 109. Universidade Federal de Santa Maria Santa Maria, Brasil.



LOURENÇO, B. B. M., **Fundamentos do direito positivo a gestão de resíduos eletroeletrônicos e o consumo consciente como mecanismos para a sustentabilidade.** Universidade Do Vale Do Itajaí – UNIVALI, Pós-Graduação E Inovação - Programa De Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciência Jurídica – PPCJ. Mestrado Em Ciência Jurídica – CMCJ. Itajaí-SC, 2019.

MAIELLO, *et al.*, **Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos.** Revista de Administração Pública, v. 52, n. 1, p. 24-51, jan. 2018.

NASCIMENTO, *et al.*, **Logística reversa dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos de pós-consumo na cidade de Teresina,** *Sistemas & Gestão*, Vol. 13, No. 4, p. 519-531, 2018. LINK: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1443>. Acesso em: 12 mar. 2023.

NICOLAI, F. N. P., **Mineração urbana: avaliação da economicidade da recuperação de componentes ricos em Au a partir de resíduo eletrônico (e-waste).** 2016. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.

PEREIRA, R. S. C., **Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos: Proposta de Indicadores de Monitoramento para Órgãos Ambientais.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, 2018. 163p.

REIS *et al.* **Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e educação ambiental.** *Revista Interdisciplinar Do Direito - Faculdade De Direito De Valença*, vol. 14, n 1, p. 99–111. Centro Universitário de Valença, 2017. DOI: 10.24859/fdv.2017.1007.

SANTANA *et al.*, **Resíduos sólidos: desenvolvimento e sustentabilidade.** 1. ed. – Recife: EDUFRPE: Gampe, 2020. Livro digital, 479 p. ISBN 978-85-7946-358-7.

SANTANA, G.; MARQUES, P. R. B. O., **Resíduo eletrônico e suas implicações ambientais: diagnóstico sobre o tema em uma instituição de ensino tecnológico.** *Ensino e Multidisciplinaridade*. V-3, n. 2, p.75-92, 2017.

SANTOS, M. C. M., **O tratamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na política nacional de resíduos sólidos.** *REDES – REVISTA ELETRÔNICA DIREITO E SOCIEDADE*, Canoas, vol.4, n. 2, p. 257-276, 2016.

VILELA, P. R., **Decreto obriga empresas a recolherem lixo eletrônico.** LINK: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2020-02/decreto-obriga-empresas-recolherem-lixoeletronico>. Publicado em 12/02/2020, Brasília. Acesso em: 20 out. 2022.

XAVIER *et al.*, **Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021. 198 p. ISBN: 978-65-5919-059-1.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

XAVIER *et al.*, **Diagnóstico da mineração urbana dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil: Projeto MINARE: relatório final.** – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023. 38 p. ISBN 978-65-5919-042-3.



AVALIAÇÃO DO FUNCIONAMENTO E INTENSIDADE LUMINOSA DE LÂMPADAS RECEBIDAS PARA RECICLAGEM EM COOPERATIVAS DE COLETA SELETIVA DA CIDADE DE PORTO ALEGRE

Josimar Souza Rosa^{1*}; Emanuele Caroline Araujo dos Santos¹; William Fernandes²;
Feliciane Andrade Brehm¹; Carlos Alberto Mendes Moraes¹

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos; ² Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

*e-mail do autor correspondente: js-rosa@hotmail.com

Resumo

A tecnologia de lâmpadas LED substituiu amplamente as lâmpadas do tipo fluorescentes e incandescentes nos últimos anos. Como se enquadram na categoria de equipamento eletroeletrônico, quando descartadas devem passar por processo de logística reversa obrigatória, prevista pela Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diante disto, é esperado que elas entrem diretamente no fluxo de reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Considerando o crescente volume de lâmpadas LED descartadas pela população, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa foi identificar o potencial de reciclagem ou reutilização de lâmpadas descartadas em duas cooperativas de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos da cidade de Porto Alegre. Do total de 831 lâmpadas recebidas, 110 ainda apresentavam boas condições de funcionamento sem necessidade de reparo, baseando-se em medições de intensidade luminosa. Uma parte delas ainda apresentava intensidade luminosa similar às lâmpadas LED novas. A maioria das lâmpadas recebidas eram de potência 9 W, o que indica esta faixa de potência como a mais comum. A pesquisa também analisou amostras de lâmpadas do tipo fluorescentes e incandescentes, recebidas de uma das cooperativas, e os resultados indicam que houve pouca possibilidade de aproveitamento destas lâmpadas. O número de lâmpadas LEDs que ainda funcionavam plenamente demonstra que esta pode ser uma nova fonte de renda para cooperativas e/ou catadores de resíduos.

Palavras-chave: Lâmpadas LED; Reciclagem; Intensidade Luminosa, Economia Circular.

1. Introdução

Lâmpadas LED são produtos eletroeletrônicos compostos de uma série de LEDs individualmente iguais, ligados em série ou paralelo, com alto fluxo luminoso, que geram luz visível e necessitam de um driver (fonte de energia) para seu funcionamento. São substitutas diretas das lâmpadas incandescentes e fluorescentes, portanto, possuem formatos similares e bases com roscas e soquetes idênticos aos modelos de tecnologias precursoras (ABILUX, 2023). As lâmpadas LED são citadas no anexo IV da diretiva europeia 2012/19/UE e no relatório do Global E-waste Monitor de 2020 como equipamentos eletroeletrônicos de iluminação (GEM 2020) (UNIÃO EUROPEIA, 2012; FORTI, et al., 2020). Como se enquadram na categoria de equipamento eletroeletrônico,

quando descartadas devem passar por processo de logística reversa obrigatória, prevista pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010).

Diante disto, é esperado que elas entrem diretamente no fluxo de reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Porém, existem ainda desafios a serem superados nos processos de gerenciamento e reciclagem, que envolvem a heterogeneidade das características físicas, complexidade e número de componentes, bem como a dificuldade de desmontagem (POURHOSSEIN; MOUSAVI, 2018; BOSSCHE et al., 2019; SILVEIRA; SANTOS; MORAES, 2019). Um ponto a ser considerado é a falta de conscientização da população durante o descarte, que pode levar a equívocos como o descarte das lâmpadas LED juntamente com os resíduos sólidos urbanos ou com lâmpadas fluorescentes, causando contaminação por mercúrio (GASSMANN et al., 2016; RAHMAN et al., 2017; SANTOS, 2019; SANTOS et al., 2020). Além disso, é comum que lâmpadas LED sejam descartadas ainda em funcionamento, por diferentes motivos.

Com as lâmpadas LED sendo inseridas no fluxo de logística reversa de REEE, espera-se que elas sejam recebidas por cooperativas ou empresas especializadas na reciclagem deste tipo de resíduo sólido. As cooperativas de materiais recicláveis podem desempenhar um papel relevante para a economia circular, contribuindo nos âmbitos social, econômico e ambiental, proporcionando trabalho e renda a pessoas em situação de vulnerabilidade (SANTOS, 2021; SANTOS et al., 2022). Tais cooperativas ou empresas podem passar a receber lâmpadas LED pós-consumo, realizar a desmontagem e assegurar a destinação de todas as partes e materiais aos seus devidos fluxos de reciclagem, gerando trabalho e renda (SANTOS, 2021). De acordo com Santos et al. (2022), tanto cooperativas de reciclagem especializadas em REEE quanto unidades de triagem da coleta seletiva (UT) têm recebido lâmpadas LED descartadas pela população. No entanto, as UT têm recebido um maior volume deste resíduo sólido, o que sugere que a população tem dificuldade em identificar as lâmpadas LED como REEE, porém identificam como reciclável. Os autores também observaram que a população carece de melhor orientação quanto ao descarte das lâmpadas, pois acabam misturando fluorescentes e incandescentes juntamente com as LED.

Neste contexto, considerando o crescente volume de lâmpadas LED descartadas pela população, o objetivo principal deste trabalho de pesquisa foi identificar o potencial de reciclagem ou reutilização de lâmpadas descartadas em duas cooperativas de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos da cidade de Porto Alegre.

2. Metodologia

As etapas metodológicas para execução do trabalho são mostradas na Figura 1. Na sequência cada uma das etapas será detalhada.

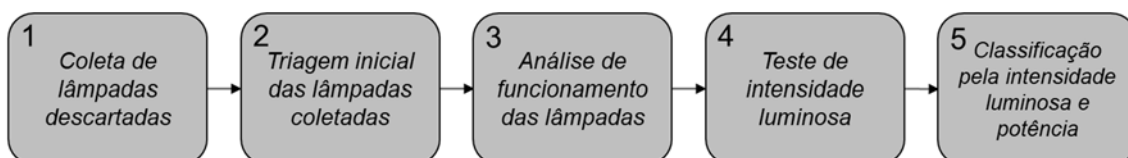


Figura 1 – Etapas metodológicas do trabalho.

Fonte: AUTORES, 2023.



2.1 Coleta de lâmpadas descartadas | Etapa 1

As amostras foram coletadas em duas diferentes UT da coleta seletiva de resíduos sólidos da cidade de Porto Alegre. Ao longo deste artigo as amostras serão denominadas como “cooperativa 1”, cuja coleta foi realizada em abril de 2022, e “cooperativa 2”, cuja coleta foi realizada em junho de 2023. Durante o período da coleta em 2022, a prefeitura da cidade de Porto Alegre realizou uma campanha específica para coletas de lâmpadas fluorescentes. Por este motivo, durante as coletas de amostras da cooperativa 1 obteve-se somente lâmpadas do tipo LED. No entanto, no período de coleta na cooperativa 2, esta campanha da prefeitura não estava mais vigente, e por isso as amostras coletadas também continham lâmpadas do tipo fluorescentes e incandescentes.

2.2 Triagem inicial das lâmpadas coletadas | Etapa 2

Os critérios estabelecidos para triagem inicial das lâmpadas foram:

- (a) Separação de lâmpadas LED, fluorescentes e incandescentes, no caso das amostras da cooperativa 2.
- (b) Separação e quantificação de unidades quebradas/danificadas e lâmpadas inteiras, de forma visual.

2.3 Análise de funcionamento das lâmpadas | Etapa 3

Nesta etapa as lâmpadas classificadas como sem danos/quebras tiveram seu funcionamento testado em uma bancada de testes conectada à rede elétrica. No quesito funcionamento, as lâmpadas fluorescentes e incandescentes recebidas da cooperativa 2 foram classificadas de acordo com dois critérios diferentes: (a) não funciona; (b) funciona. Já as lâmpadas LED coletadas em ambas cooperativas foram classificadas dentro dos seguintes grupos, mediante conexão ao suporte energizado:

- (a) Não funciona: a lâmpada não acende.
- (b) Funciona parcialmente: a lâmpada acende, mas com intensidade baixa (apenas observação visual), ou pisca aleatoriamente.
- (c) Funciona plenamente: a lâmpada acende e produz brilho intenso, como se estivesse funcionando normalmente.

2.4 Teste de intensidade luminosa | Etapa 4

Para avaliação da intensidade luminosa das lâmpadas que funcionavam plenamente empregou-se um luxímetro da marca Minipa, modelo MLM-1011. O instrumento é do tipo portátil, o que facilitou a sua instalação na bancada de testes de lâmpadas, e proporciona medidas na unidade lux, abrangendo a faixa de 1 lux até 100000 lux. O fabricante reporta uma precisão de $\pm 4\%$. A Figura 2 mostra uma imagem do instrumento e um esquema da montagem experimental para teste das lâmpadas.



Figura 2 – Medição da intensidade luminosa: (a) luxímetro minipa MLM-1011; (b) esquema do procedimento de medição.
Fonte: AUTORES, 2023.

2.5 Classificação pela intensidade luminosa e potência | Etapa 5

Todas as lâmpadas LED recebidas foram analisadas individualmente para fins de registro do valor de sua potência. A partir desta informação pode-se identificar as faixas de potências mais incidentes nas amostras coletadas. As lâmpadas LED que ainda funcionavam plenamente, durante os testes da etapa 2.4, também tiveram sua potência registrada, visando identificar o estado da intensidade luminosa em função da potência.

3. Resultados e discussões

3.1 Lâmpadas coletadas na cooperativa 1

Conforme citado anteriormente, na cooperativa 1 foram coletadas apenas lâmpadas do tipo LED. O balanço geral das unidades de lâmpadas é mostrado na Figura 3. De acordo com os dados apresentados, a maior parte das lâmpadas coletadas (52,6%) efetivamente não funcionava, podendo assim ser encaminhadas para processo de beneficiamento, especificamente, desmontagem, dentro do próprio laboratório. Porém, 47,4% das lâmpadas ainda poderiam ser reaproveitadas para uso, seja por funcionar plenamente (12,7%) ou por funcionar parcialmente (34,5%), requerendo algum procedimento de manutenção. As lâmpadas danificadas compuseram aproximadamente 4% do total. Os principais danos encontrados foram trincas ou quebras no corpo, bulbos amassados e conector roscado amassado. Quanto à potência das lâmpadas recebidas da cooperativa 1, os resultados dos registros são mostrados na Figura 4. Em apenas 1 lâmpada não foi possível identificar a potência. Os gráficos incluem as lâmpadas quebradas ou danificadas. Os resultados da contagem geral, Figura 4a, mostram que 53,2% das lâmpadas são de 9 W. A potência 12 W é a segunda mais encontrada, compondo 11,7%. Quantidades notáveis também foram encontradas para 15 W, 8 W, 6 W e 7 W. Na análise mais detalhada da Figura 4b, observa-se que as lâmpadas que não funcionam compõem a maior parcela praticamente em todas as potências encontradas, o que resulta da sua maior proporção na amostra analisada. Apenas as lâmpadas 9 W que ainda



funcionam, parcial ou plenamente, somadas, representam 25,1% do total de lâmpadas inteiras.

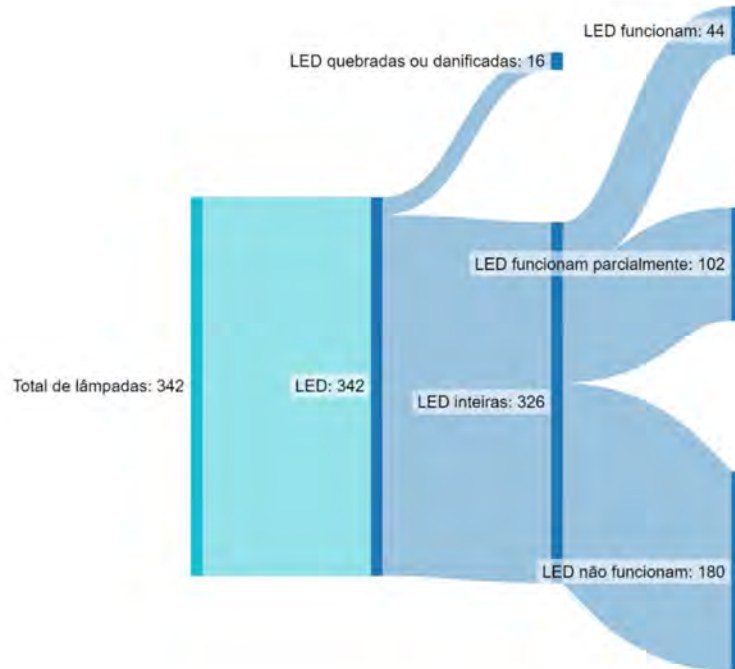


Figura 3 – Quantificação das lâmpadas coletadas na cooperativa 1.

Fonte: AUTORES, 2023.

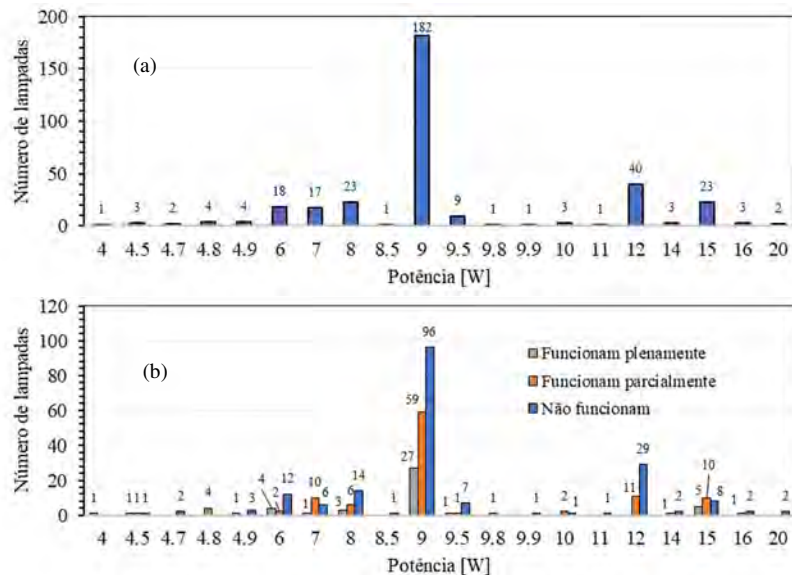


Figura 4 – Classificação da quantidade de lâmpadas LEDs por tipo versus por potência: (a) contagem geral; (b) por tipo classificado (cooperativa 1).

Fonte: AUTORES, 2023.



3.1.1 Análise do funcionamento das lâmpadas LEDs – cooperativa 1

Quanto às lâmpadas coletadas na cooperativa 1 e que funcionavam plenamente, os resultados das medições de intensidade luminosa são mostrados na Figura 5.



Figura 5 – Número de lâmpadas LEDs por faixa de intensidade luminosa (cooperativa 1).

Fonte: Autores (2023)

Os resultados mostram que 27,7% das lâmpadas ficaram dentro da faixa de 201-250 lux, sendo todas elas lâmpadas de 9 W. Para fins de comparação, 5 lâmpadas LEDs novas de 9 W e diferentes marcas foram adquiridas e testadas. Os resultados das lâmpadas novas foram: 230 lux; 206 lux, 218 lux, 235 lux e 213 lux. Observa-se que todas as lâmpadas novas de 9 W ficaram dentro da faixa de 201-250 lux. Pode-se concluir que 10 unidades de lâmpadas 9 W descartadas estavam funcionando como novas. Na faixa de 101-150 lux, 4 lâmpadas eram de 9 W, 1 de 9,5 W, 1 de 7 W, 2 de 6 W, 1 de 4,9 W e 1 de 4 W. Nesta faixa as lâmpadas de 9 W apresentaram intensidade luminosa inferior a esperada, em comparação com as novas. A única lâmpada da faixa entre 550-600 lux, com 594 lux, era de potência 15 W. Por sua vez, a única lâmpada da faixa 0-50 lux, com 36 lux, era de potência 9 W. Algumas possíveis aplicações para as lâmpadas encontradas com maior frequência, de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR/ISO 8995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), são:

- 101-150 lux: áreas de circulação em corredores de edificações, salas de descanso, depósitos, estoques, câmaras frias, casas de caldeira, salas de secagem.
- 201-250 lux: salas de espera, refeitórios/cantinas, vestiários, banheiros, instalações de produção com operação manual contínua.

3.2 Lâmpadas coletadas na cooperativa 2

O balanço geral das unidades de lâmpadas coletadas na cooperativa 2 é mostrado na Figura 6. Os dados mostram que do total coletado nesta cooperativa, 5,7% foram lâmpadas do tipo incandescente, dentre as quais apenas 2 unidades estavam funcionando. Em comparação com o total de lâmpadas recebidas, as incandescentes compuseram um percentual baixo, o que se deve ao seu uso reduzido atualmente em função da proibição de sua comercialização, no Brasil, em 2016. As lâmpadas fluorescentes somaram 37,8% do total. Esta tecnologia, nos últimos 10 anos, vem sendo substituída pelas lâmpadas do tipo LED. Do total de lâmpadas fluorescentes, 69,7% apresentavam algum tipo de dano, como partes soltas, trincas ou vidro quebrado, impossibilitando o seu teste de



funcionamento. O restante, 30,3% (56 unidades), apresentava-se em condições visuais aparentemente adequadas para um teste de funcionamento. Após os testes, 12 lâmpadas fluorescentes foram classificadas como funcionando, ou seja, 6,4% do total de fluorescentes.

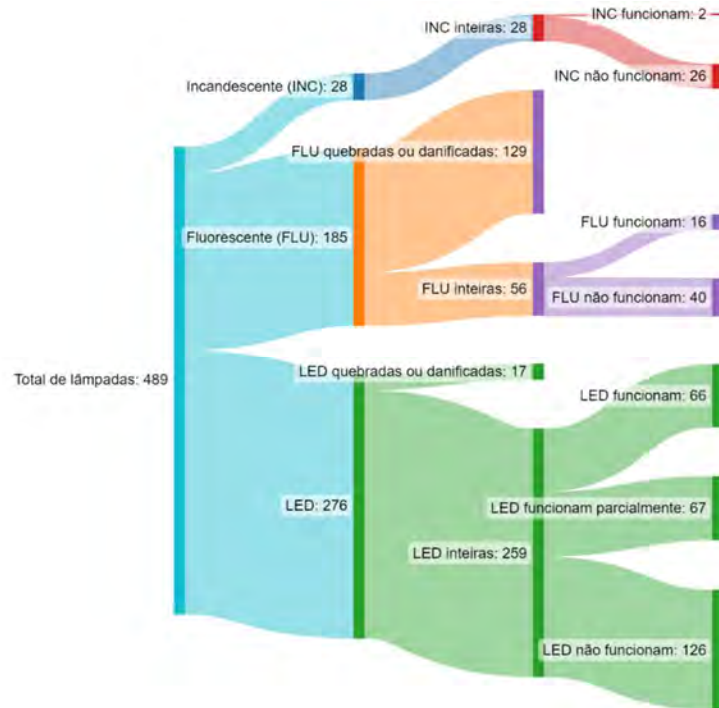


Figura 6 – Quantificação das lâmpadas coletadas na cooperativa 2 .
Fonte: AUTORES, 2023.

As lâmpadas de tecnologia LED somaram 56,4% do total, sendo, portanto, a amostra mais significativa. A triagem inicial para separação de lâmpadas danificadas resultou em 17 unidades de lâmpadas LED, ou seja, 6,1% do total de LEDs coletadas. A maior parte das lâmpadas LED, 48,6%, não funcionou durante os testes realizados. A parcela que funcionou plenamente, como se fosse aparentemente nova, foi de 25,5%. Por fim, as lâmpadas LED que apresentaram funcionamento parcial foram 25,9%. Assim, nota-se que mais da metade das lâmpadas LED coletadas na cooperativa 2 ainda poderiam ser utilizadas, estando aparentemente funcionando normalmente ou ainda podendo ser recuperadas com algum tipo de manutenção. Considerando todos os tipos de lâmpadas coletadas na cooperativa 2, 30% (147 unidades) ainda estavam funcionando, seja parcial ou plenamente, excluindo-se aquelas quebradas. Algumas lâmpadas LED, ainda que quebradas ou danificadas, funcionavam, porém elas não foram contabilizadas como passíveis de recuperação ou reuso. Este número demonstra o potencial para reaproveitamento de lâmpadas descartadas, que podem retornar de alguma forma ao mercado. Em uma escala local, as lâmpadas reaproveitadas podem gerar uma renda adicional para cooperativas de coleta de REEE e cooperativas de coleta seletiva, ou mesmo catadores autônomos, contribuindo assim para o desenvolvimento regional. Em

uma escala global, o reaproveitamento de lâmpadas ainda funcionais em todo planeta pode contribuir para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a redução da demanda por energia, processos intrínsecos à fabricação das lâmpadas. Wehbie and Semetey (2022) analisaram 133 lâmpadas do tipo LED descartadas. Os resultados mostraram que cerca de 30,8% das lâmpadas LED ainda estavam funcionando e poderiam ser reaproveitadas na economia social e solidária, ou ainda recomercializadas se economicamente viável. Por outro lado, o teste de funcionalidade das lâmpadas não funcionais mostrou que 56,5% dos módulos de LED e 75% dos chips de LED ainda são funcionais. Os autores concluem que consertar as lâmpadas não funcionais ou reutilizar seus componentes funcionais é um desafio e, portanto, sua reciclagem é altamente recomendada. Quanto à potência das lâmpadas recebidas da cooperativa 2, os resultados dos registros são mostrados na Figura 7. Em 4 lâmpadas não foi possível identificar a potência. Os gráficos incluem as lâmpadas quebradas ou danificadas.

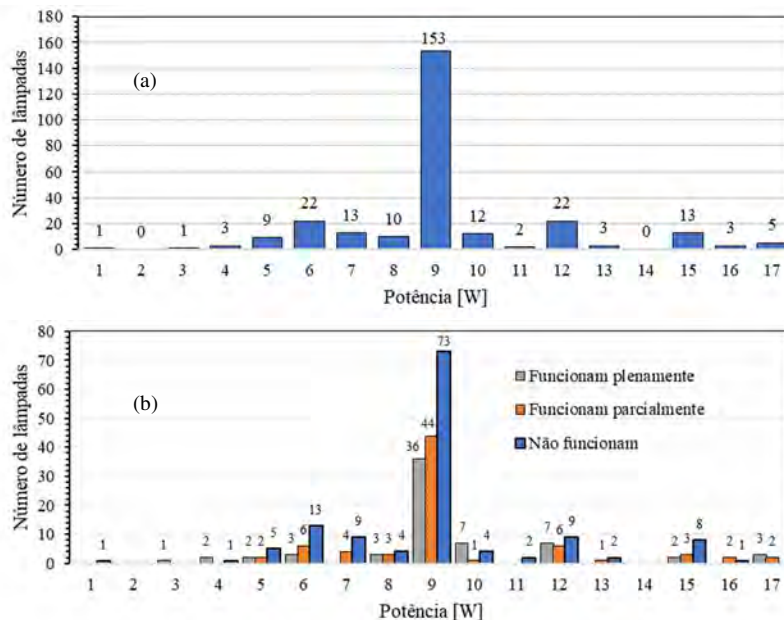


Figura 7 – Classificação da quantidade de lâmpadas LEDs por tipo versus por potência: (a) contagem geral; (b) por tipo classificado (cooperativa 2).

Fonte: AUTORES, 2023.

Os resultados da contagem geral, Figura 7a, indicam que 56,3% das lâmpadas LEDs são de 9 W. As potências de 6 W e 12 W ficaram em segundo lugar, com 8,1%. De forma geral observa-se que o maior número de lâmpadas fica efetivamente em torno da potência de 9 W, tendo sido encontradas poucas lâmpadas abaixo de 4 W e acima de 12 W, exceto a potência de 15 W. De fato, grande parte das lâmpadas comercializadas para uso residencial ou comercial (escritórios, etc.) fica na faixa de 9 W. A análise mais detalhada de potência por tipo classificado, Figura 7b, mostra que as lâmpadas que não funcionam são maioria em praticamente todas as potências encontradas. Somente as lâmpadas de 9 W que ainda funcionam (parcial ou plenamente) representam 30,9% do

total das lâmpadas LED inteiras, e 55,6% de todas as LED inteiras que funcionam parcial ou plenamente. Por fim, como as lâmpadas do tipo fluorescente possuem o bulbo de vidro, em geral elas resistem menos a impactos que podem ocorrer no processo de transporte entre o descarte, coleta e recebimento do resíduo nas cooperativas. Neste quesito, as LEDs possuem a vantagem de serem constituídas estruturalmente de polímero no corpo e no bulbo, que resiste mais aos impactos. Portanto, esperava-se que houvesse um percentual maior de lâmpadas fluorescentes quebradas do que LED, como efetivamente ocorreu. É importante ressaltar que as lâmpadas fluorescentes nem deveriam ser descartadas junto às demais lâmpadas tão pouco na coleta seletiva e sem nenhuma proteção. Esta prática, conforme reporta a literatura, ocasiona a contaminação das outras lâmpadas e também dos demais resíduos, além de pôr em risco os trabalhadores da UT e do setor de reciclagem.

3.2.1 Análise do funcionamento das lâmpadas fluorescentes – cooperativa 2

As lâmpadas fluorescentes possuem como características a necessidade de um período para aquecimento, atingindo assim o seu valor máximo de intensidade luminosa. O teste inicial para segregar as lâmpadas que funcionavam daquelas que não funcionavam consistiu em apenas verificar rapidamente se a lâmpada estava acendendo ou não. Em um segundo momento, as lâmpadas classificadas como funcionando foram ligadas e deixadas por 1 minuto no suporte, para que então fosse verificada a intensidade luminosa, usando o luxímetro. Das 14 lâmpadas fluorescentes que inicialmente foram classificadas como funcionando, duas não resistiram ao teste de 1 minuto energizadas, parando de funcionar durante o teste. Os testes e os retestes das lâmpadas fluorescentes se mostraram aparentemente perigosos, pois as lâmpadas, apesar de acesas, demonstravam algum tipo de anomalia, como estalos ou faíscas. Os resultados das medições de intensidade luminosa nas lâmpadas fluorescentes são mostrados na Figura 8. Os resultados mostram que a maioria das lâmpadas se encontra em faixa entre 51 e 100 lux, e apenas 1 lâmpada em faixas acima de 151 lux. Algumas aplicações recomendadas pela norma ABNT NBR/ISO 8995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), são:

- 51-100 lux: edificações de agricultura, como estábulos, áreas de secagem, e instalações de processamento operadas remotamente.

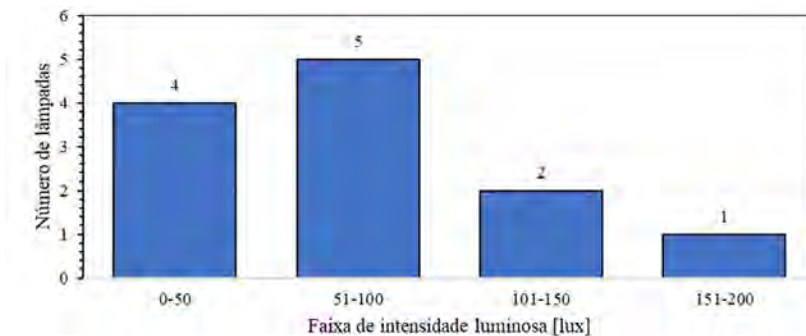


Figura 8 – Número de lâmpadas fluorescentes por faixa de intensidade luminosa.

Fonte: AUTORES, 2023.



3.2.2 Análise do funcionamento das lâmpadas LEDs – cooperativa 2

A lâmpadas LED que funcionavam parcialmente representaram 25,4% do total coletado na cooperativa 2. Os resultados das medições de intensidade luminosa são mostrados na Figura 9.



Figura 9 – Número de lâmpadas LEDs por faixa de intensidade luminosa (cooperativa 2).

Fonte: Autores (2023)

Os dados mostram que 32,3% das lâmpadas LEDs que ainda funcionavam plenamente resultaram em intensidade luminosa entre 201 lux e 250 lux. Algumas possíveis aplicações para as lâmpadas encontradas com maior frequência, de acordo com as recomendações da norma ABNT NBR/ISO 8995 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2013), são:

- 201-250 lux: salas de espera, refeitórios/cantinas, vestiários, banheiros, instalações de produção com operação manual contínua, dentre outras.
- 151-200 lux: rampas de carregamento, estação de controle, instalações de processamento com intervenção manual limitada ou ocasional.
- 51-100 lux: edificações de agricultura, como estábulos, áreas de secagem, e instalações de processamento operadas remotamente.

Em comparação com os valores obtidos nos testes das lâmpadas novas, concluiu-se que 22 unidades de lâmpadas LED coletadas como resíduo ainda poderiam ser usadas com a mesma aplicação de uma lâmpada 9 W nova. 20 delas eram efetivamente lâmpadas de 9 W, porém 1 era de 10 W e 1 de 12 W. Por fim, quanto às lâmpadas incandescentes, as duas unidades coletadas que ainda funcionavam apresentaram intensidade luminosa de 1198 lux (100 W) e 35 lux (25 W).

4. Considerações finais

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa foi identificar o potencial de reciclagem ou reutilização de lâmpadas descartadas em duas cooperativas de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos da cidade de Porto Alegre. Após os processos de triagem, classificação e testes, as principais considerações finais são as seguintes:

- (a) As lâmpadas de tecnologia LED apresentam maior potencial de reutilização, seja por reinserção direta no mercado (funcionando plenamente) ou por reinserção



- após manutenção (funcionando parcialmente), em comparação com as lâmpadas fluorescentes e incandescentes.
- (b) Os testes das lâmpadas fluorescentes mostraram-se de difícil execução, com algumas lâmpadas estalando e faiscando. Por isso, considerando ainda o baixo potencial de aproveitamento destas lâmpadas, os autores concluem que é mais viável e seguro focar no trabalho com as lâmpadas de tecnologia LED, quando a intenção é recuperar ou reusar a lâmpada.
- (c) O número de lâmpadas LEDs que ainda funcionavam plenamente demonstra que esta pode ser uma nova fonte de renda para cooperativas e/ou catadores de resíduos sólidos. Estas lâmpadas ainda possuem um valor de mercado, portanto garantindo circularidade, mesmo que haja incerteza quanto ao seu tempo restante de vida útil.

Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES por bolsas de mestrado e doutorado, ao CNPq pelas bolsas e auxílio (processos CNPq n°: 381825/2023-0, 304755/2022-2, 407915/2022-2), e bolsas CNPq de produtividade DT2.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO (ABILUX). **Guia LED descomplicado**. 2023. Disponível em: <https://www.abilux.com.br/docs/ABILUX_GuiaLED-Descomplicado_REV_052023.pdf> Acesso em: 10 ago. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/CIE 8995-1: Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior**. Rio de Janeiro, 2013.

BOSSCHE, A. V.; VEREYCHEN, W.; HOOGERSTRAETE, T. V.; DEHAEN, W.; BINNEMANS, K. **Recovery of Gallium, Indium, and Arsenic from Semiconductors Using Tribromide Ionic Liquids**. ACS Sustainable Chem. Eng., 2019. DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b01724

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 10 ago. 2023.

CENCI, M. P.; BERTO, F. C. D.; SCHNEIDER, E. L.; VEIT, H. M. **Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective**. Waste Management, v. 107, p. 285-293, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.04.028>

Directive 2012/19/UE of the European Parliament and of the Council. Of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Official Journal L 197, p. 59, 2012. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2012:197:FULL&from=PT>. Acesso em: 23 jul. 2023.

SANTOS, E. C. A.; SILVA, J. L. C.; EVALDT, D. C.; MORAES, C. A. M. **Beneficiamento de Lâmpadas LED Inservíveis em uma Cooperativa de Reciclagem**



de Resíduos Eletroeletrônicos. MIX Sustentável, [S.l.], v. 8, n. 4, p. 63-76, 2022. Acesso em: 10 ago. 2023 DOI: <https://doi.org/10.29183/2447-3073.MIX2022.v8.n4.63-76>

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-Waste Monitor 2020 - Quantities, flows, and the circular economy potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020. Disponível em: <<http://ewastemonitor.info/>>. Acesso em: 10 ago 2023.

GASSMANN, A. ZIMMERMANN, J.; GAUß, R. STAUBER, R. GUTFLEISCH, O. **Led lamps recycling technology for a circular economy**. Latest LPR Magazine. n. 25, 2016. Disponível em: < <https://www.led-professional.com/resources-1/articles/led-lamps-recycling-technology-for-a-circular-economy>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

POURHOSSEIN, F.; MOUSAVI, S. M. **Enhancement of copper, nickel, and gallium recovery from LED waste by adaptation of *Acidithiobacillus ferrooxidans***. Waste Management. v. 79, p. 98-108, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.07.010>

RAHMAN, S. M. M.; KIM, J.; LERONDEL, G.; BOUZIDI, Y.; NOMENYO, K.; CLERGET, L. **Missing research focus in end-of-life management of light-emitting diode (LED) lamps**. Resources, Conservation & Recycling. v. 127, p.256-258, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.013>

SANTOS E. C. A.; SILVEIRA, T. A.; COLLING, A. V.; MORAES, C. A. M.; BREHM, F. A. **Recycling Processes for the Recovery of Metal from E-waste of the LED Industry**. In: KHAN, A.; INAMUDDIN; ASIRI, A. M. (Eds). **E-waste Recycling and Management – Present Scenarios and Environmental Issues**. 1 Ed. Springer Nature Switzerland AG. p. 159-177, 2020.

SANTOS, E. C. A; CAMACHO, A. L. D.; RAUBER, L. D.; MORAES, C. A. M. **Desmontagem e caracterização de Lâmpadas LED para Recuperação de Materiais**. In: TULLIO, L. (Org.). **Gestão de Resíduos Sólidos 2**. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. *E-book*. Disponível em: < <https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/03/E-book-Gest%C3%A3o-de-Res%C3%ADuos-S%C3%B3lidos-2-2.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

SILVEIRA, T. A.; SANTOS, E. C. A.; MORAES, C. A. M. **O Ecodesign e a Geração de Resíduos: Uma Abordagem Sobre os Eletroeletrônicos**. In: AGUILERA, J. G.; ZUFFO, A. M. (Org.). **A Preservação do Meio Ambiente e o Desenvolvimento Sustentável 2**. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. *E-book*. Disponível em: < <https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/08/Ebook-A-Preservacao-do-Meio-Ambiente-e-o-Desenvolvimento-Sustentavel-2-1.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2023.

WEHBIE, M.; SEMETHEY, V. **Characterization of end-of-life LED lamps: Evaluation of reuse, repair and recycling potential**. Waste Management, v. 141, p. 202-207, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.01.037>



CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DOS COMPONENTES QUÍMICOS DAS MEMÓRIAS RAM

BARRETO, A. A.^{1*}; AQUINO, I. B. M.²; SOUSA, W. J. B. de.³

¹ Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral

² Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia.

³ Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Unidade Acadêmica de Engenharia de Materiais.

* alinearrudab@gmail.com

Resumo

A sociedade moderna enfrenta desafios relacionados ao descarte inadequado de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), como computadores e celulares. Esses resíduos contêm componentes valiosos, como memórias RAM, que possuem polímeros, cerâmicas e metais como Cobre, Prata, Ouro e Paládio. A reciclagem adequada desses resíduos é crucial para evitar danos ao meio ambiente. Neste estudo, foram caracterizadas tecnologicamente as memórias RAM de computadores inoperantes da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, a qual é um tipo de Placa de Circuito Impresso (PCI). O processo envolveu desmontagem, separação e pesagem dos componentes, seguidos de moagem, separação granulométrica e separação magnética. As análises por microscopia eletrônica de varredura e difração de raio-X e espectroscopia por energia dispersiva permitiram identificar e quantificar os elementos presentes nas memórias RAM. Foram encontrados elementos como Cobre, Ouro, Ferro, Nióbio, entre outros, nas amostras magnéticas e não-magnéticas. Assim como o Chumbo, Estanho e Antimônio, em concentrações variadas. Por fim, a pesquisa se concentrou na identificação e quantificação dos elementos químicos que se encontram nas memórias RAM, com o objetivo de transformá-los em matéria-prima para a indústria.

Palavras-chave: Memória RAM; Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos; Placas de Circuito Impresso; Mineração Urbana; Caracterização Tecnológica.

1. Introdução

O rápido avanço tecnológico das últimas décadas resultou em um aumento significativo no descarte de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, causando preocupações ambientais. Estima-se que apenas uma pequena porcentagem desses resíduos é adequadamente reciclada, criando a necessidade de encontrar soluções eficientes para reutilizar os metais preciosos presentes nesses equipamentos. A reciclagem é considerada uma resposta responsável para obter materiais essenciais, como



Ouro, Prata e Cobre, e reduzir o impacto ambiental negativo associado ao consumo acelerado de recursos naturais (NICOLAI, 2016; AFONSO, 2018; CAMPOS *et al.*, 2020).

No Brasil, a regulamentação da reciclagem de resíduos sólidos foi estabelecida pela Lei Federal nº 12.305/2010, conhecida como Política Nacional dos Resíduos Sólidos, que introduziu a logística reversa, tornando os fabricantes e distribuidores de eletroeletrônicos responsáveis por coletar e destinar adequadamente os produtos colocados no mercado (BRASIL, 2010).

Apesar das medidas regulatórias, o descarte inadequado ainda persiste devido à falta de informação da população e à responsabilidade das empresas fabricantes (BALDÉ *et al.*, 2017). Diante desse cenário, o presente artigo tem como objetivo apresentar os resultados obtidos pela caracterização tecnológica das memórias RAM retiradas de computadores inoperantes da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, buscando identificar a composição dessas memórias, cujas informações detalhadas ainda são escassas em pesquisas anteriores. A pesquisa visa contribuir para uma abordagem mais eficiente da reciclagem de eletroeletrônicos, visando equilibrar as necessidades tecnológicas com a proteção ambiental.

2. Embasamento Teórico

O avanço tecnológico nas últimas décadas resultou em um novo tipo de “lixo” chamado Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), proveniente do descarte de dispositivos eletrônicos como computadores, celulares, entre outros. Esse aumento na geração de REEE representa um grande problema ambiental e socioeconômico, já que muitos desses equipamentos são descartados de maneira inadequada. O Brasil é o 5º maior produtor de resíduos eletroeletrônicos no mundo, gerando cerca de 2,5 milhões de toneladas anualmente, mas apenas 3% desse montante é coletado para reciclagem ou descarte adequado (AFONSO, 2018; DACOREGIO, 2018; CAMPOS *et al.*, 2020).

Esses resíduos contêm componentes tóxicos e cancerígenos, como metais pesados, que são prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana. No entanto, muitos REEE também contêm materiais valiosos, como metais nobres e preciosos, que podem ser recuperados e reutilizados por meio da Mineração Urbana, uma técnica de reciclagem crescente (ABRAMOVAY; SPERANZA; PETITGAND, 2013; CUNHA; AUGUSTIN, 2014).

Apesar das possibilidades de reciclagem, a gestão de REEE é um desafio global devido à falta de infraestrutura adequada e regulamentações eficazes em muitos países. Muitos resíduos eletrônicos são exportados para nações com regulamentações menos rigorosas ou acabam em aterros sanitários em países em desenvolvimento, causando danos ao meio ambiente e à saúde (NICOLAI, 2016; BOSQUESI; FERREIRA, 2018; XAVIER *et al.*, 2021).

Portanto, políticas sociais e regulamentações eficazes são necessárias para lidar com o problema dos resíduos eletroeletrônicos, visando garantir que sejam corretamente coletados, transportados e processados. A gestão adequada de REEE não apenas ajuda a preservar o meio ambiente, mas também pode gerar empregos e impactos positivos na economia (NICOLAI, 2016; RAJOVIC, 2016; CALDAS *et al.*, 2019).



Para lidar com essa questão, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida pela lei 12.305 em 2010, tem como objetivo promover uma gestão integrada e ambientalmente adequada dos resíduos sólidos. Essa política estabelece diretrizes, metas e ações a serem adotadas por diversos setores, incluindo empresas, governos e entidades privadas, visando a proteção do meio ambiente (BRASIL, 2010).

A logística reversa é um processo essencial para facilitar a coleta e o retorno dos resíduos eletroeletrônicos às empresas, com o intuito de reutilizá-los ou destiná-los corretamente do ponto de vista ambiental. As empresas têm a responsabilidade de implementar essa prática, proporcionando meios para que os clientes possam devolver os produtos obsoletos. Além disso, é fundamental realizar campanhas de educação ambiental para garantir a eficácia da logística reversa (AFONSO, 2018; CAMPOS *et al.*, 2020).

A fim de fortalecer a implementação da PNRS, foram promulgados decretos, como o Decreto 10.240/2020, que estabelece normas para a logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico. Em 2022, o Decreto 10.936 trouxe regulamentações adicionais, centralizando a gestão dos sistemas de logística reversa pelo Ministério do Meio Ambiente e estabelecendo a obrigatoriedade de emissão de documentos ambientais (BRASIL, 2020; BRASIL, 2022).

A mineração urbana é uma abordagem que busca minimizar a permanência dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em depósitos, aterros sanitários e outros locais, reduzindo assim os impactos ambientais. Além disso, essa prática contribui para a diminuição da demanda por minérios na mineração tradicional. A relação entre oferta e demanda de matérias-primas e produtos industriais é fundamental para determinar os preços finais. Com o avanço da ciência, surgimento de novas tecnologias e o aumento da população, a sociedade tem uma demanda crescente por produtos industrializados (SANTOS, 2016; SANTANA; MARQUES, 2017; XAVIER *et al.*, 2023).

No entanto, no Brasil, a reciclagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos enfrenta diversos desafios. A cadeia de reciclagem não está completa devido a fatores como a falta de cumprimento das normas estabelecidas pela Lei nº 12.305 e seus decretos. Mais de 90% dos resíduos sólidos no Brasil são destinados a aterros sanitários, aterros controlados e lixões, enquanto apenas 10% são encaminhados para unidades de compostagem, triagem, reciclagem, incineração ou outros destinos. Essa situação representa um problema significativo no país (NICOLAI, 2016; RAJOVIC, 2016; CALDAS *et al.*, 2019).

A caracterização tecnológica de minerais é um processo crucial na indústria mineral, pois envolve o estudo das propriedades físicas, químicas e minerais das amostras. Ela é realizada por meio de diversas análises e técnicas, como análise química, mineralógica e física, para determinar a qualidade, composição e potencial de uso das matérias-primas. A caracterização tecnológica contribui para o dimensionamento adequado dos processos, otimizando o rendimento global e auxiliando na gestão eficiente dos recursos minerais. Em suma, esse processo é fundamental para o aproveitamento eficaz dos recursos minerais e a produção de materiais de qualidade na indústria mineral (NERY, 2016; TEIXEIRA, 2019).

A composição da Memória RAM não é detalhada na literatura, mas é conhecido que ela é uma placa de circuito impresso (PCI) composta por uma variedade de metais, plásticos e materiais cerâmicos, com uma predominância da fase não metálica. Podendo

variar de acordo com a aplicação, a origem do material e os métodos analíticos utilizados. A fração não metálica inclui plásticos retardantes de chama, polímeros halogenados, resinas e fibra de vidro, enquanto a fração metálica é composta por metais de base como Cobre, Ferro, Alumínio e Estanho, além de metais raros e nobres. Também é possível encontrar metais perigosos como Crômio, Chumbo, Berílio, Mercúrio, Cádmio, Zinco e Níquel nas placas de circuito impresso (VIET, 2005; NICOLAI, 2016).

A reciclagem das placas de circuito impresso, visando a recuperação dos metais presentes, é uma alternativa viável e importante devido ao valor agregado desses metais. A caracterização da composição da memória RAM é necessária devido à existência de diferentes tipos de placas de circuito impresso, com variações na concentração e composição dos materiais, especialmente os metais. A caracterização é fundamental para entender a composição específica da memória RAM e determinar seu potencial de recuperação de matéria-prima para a indústria eletroeletrônica (YAMANE, 2012).

3. Resultados e Discussões

3.1 Coleta e Desmontagem

Inicialmente, foram coletados 281 gabinetes de computador obsoletos na UFCG, os mesmos foram separados, pesados e desmontados manualmente, e cada parte que constituía o gabinete passava por uma triagem, para ser pesada, catalogada e colocada no local destinado (Figura 1). Ao final do processo obteve-se um total de 1849,32 kg de material de modo geral, sendo 4,783 kg de memória RAM.

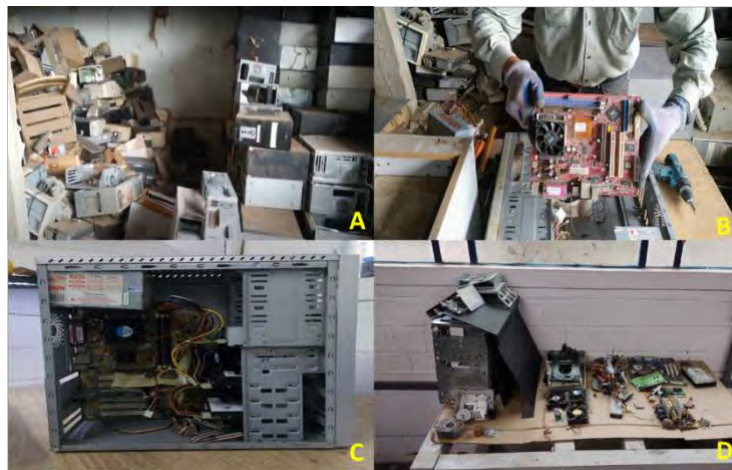


Figura 1 – A) Gabinetes acumulados; B) Desmontagem dos gabinetes de computador; C) Interior de um Gabinete de computador; D) Gabinete de computador desmontado.

Fonte: BARRETO, 2023.

3.2 Cominuição

Para a cominuição foi utilizado um triturador picador forrageiro adaptado a fim de triturar as memórias RAM, reduzindo assim as granulometrias (Figura 2). O triturador picador forrageiro foi totalmente lacrado para evitar perdas de material por dispersão, por

exemplo. Inicialmente, foi cominuído 45 unidades de memória RAM, que pesavam 810g, e ao fim do processo, obteve-se 779g, sendo perdido o equivalente a 31g, que equivale a 1,72 placa.



Figura 2 – Triturador picador forrageiro adaptado.
Fonte: BARRETO, 2023.

3.3 Peneiramento

O peneiramento foi utilizado a fim de separar por granulometria o material que foi cominuído anteriormente, para tal processo foi utilizado um conjunto de 13 peneiras e um prato (Figura 3), e foi obtido 14 amostras com granulometrias que variaram do retido a 7 mesh ao passante de 325 mesh. Para que a operação fosse totalmente executada foram gastos cerca de 20 minutos para o peneiramento completo das 779g de material.



Figura 3 – Conjunto de peneiras e o agitador eletromagnético.
Fonte: BARRETO, 2023.

3.4 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva de Raios-X (EDS) – MEV-EDS

O MEV tem como princípio obter as informações morfológicas das amostras, como avaliar a estrutura superficial das amostras, as formas presentes, irregularidades, bolhas, impurezas, entre outras. E o EDS tem como princípio identificar a composição semiquantitativa e qualitativa das amostras, estimando a concentração dos elementos químicos presentes nas amostras estudadas, foram utilizadas 4 amostras para esse ensaio, sendo elas: Amostra 1 - retido a 7 mesh, Amostra 2 - retido a 48 mesh, Amostra 3 - retido a 325 mesh e Amostra 4 - passante de 325 mesh (Figura 4).

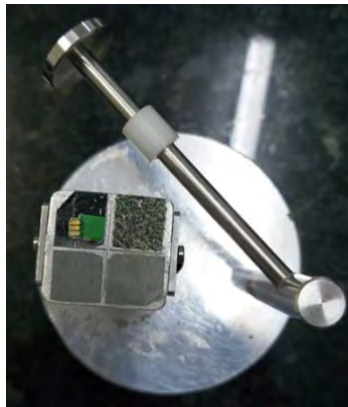


Figura 4 – Amostras analisadas em MEV-EDS.
Fonte: BARRETO, 2023.

Análise por Espectroscopia de Energia Dispersiva (EDS) foi realizada em quatro amostras relacionadas à memória RAM cominuída. Na Amostra 1, identificou-se a presença de estanho, carbono, oxigênio, cobre, silício e alumínio, além de traços de ouro, cromo, magnésio e manganês em menor quantidade. Na Amostra 2, constatou-se ouro, cobre, oxigênio e silício no espectro geral, enquanto que em análises pontuais foram observados carbono, cálcio, alumínio e magnésio. Na Amostra 3, a análise geral revelou silício, cálcio, alumínio, carbono e oxigênio, e nos pontos pontuais, notou-se a presença discreta de bário, magnésio e nióbio, sem repetições. Na Amostra 4, o EDS geral apontou carbono, oxigênio, níquel, silício e alumínio, e nos pontos pontuais detectaram-se estanho, cálcio, cromo e magnésio.

O objetivo das análises de EDS foi determinar a composição geral da memória RAM cominuída, incluindo suas partes magnéticas e não magnéticas, antes da separação magnética ser realizada.

3.5 Difração de Raios-X – DRX

O DRX gera os perfis cristalográficos das amostras, na qual a partir do difratograma pode-se determinar a rede cristalina da amostra, e que torna possível obter as informações sobre as propriedades dos elementos químicos presentes, e o DRX é um método de análise quantitativa. E para esse ensaio foram utilizadas as mesmas granulometrias utilizadas no ensaio de MEV-EDS (Figura 5).

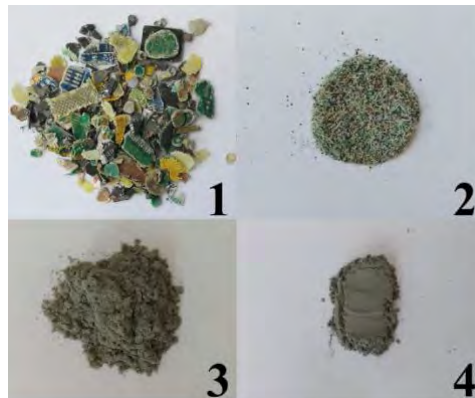


Figura 5 – Material utilizado - Amostra 1: 7 mesh; Amostra 2: 48 mesh; Amostra 3: 325 mesh; Amostra 4: Passante 325 mesh.
Fonte: BARRETO, 2023.

Os resultados obtidos após confrontar os dados obtidos pelo MEV-EDS e os dados obtidos pela análise dos difratogramas de DRX, foram encontrados 8 elementos químicos com picos significativos, sendo eles: Alumínio, Carbono, Cobre, Cromo, Estanho, Ouro, Oxigênio e Silício, em concentrações diversas.

3.6 Separação Magnética

Já a separação magnética tem como propósito a separação do material magnético e não-magnético, e a separação do material foi por meio de um separador magnético de tambor, na qual, era esperado pelo menos 2 produtos. Mas, na separação magnética, obteve-se 3 produtos, o magnético, o não-magnético e o produto a ser reprocessado, que foi o material que tinha uma granulometria maior que 6mm, que a granulometria mínima do equipamento (Tabela 1).

Material	Peso (g)	Porcentagem (%)	Perda (%)
Não-magnético	400,6 g	51,435%	2,103%
Magnético	88,6 g	11,405%	0,476%
TOTAL	489,2 g	62,84%	2,579%

Tabela 1 – Resumo das pesagens dos materiais magnético e não-magnético após a separação magnética.
Fonte: BARRETO, 2023.

Pode-se observar que as porcentagens das frações não-magnéticas foram mais relevantes, na qual concentra-se cerca de 51,435%, enquanto as frações magnéticas, de modo geral, apresentaram cerca de 11,405%, cerca de 40,03% de diferença. E também pode-se observar que foi dispersado cerca de 30,88g de material, o equivalente a 3,964%. E o material que ficou retido para ser reprocessado, é cerca de 258,6g referente a 33,196%, que foi o material grosseiro que ficou retido até a peneira de 20 mesh.



3.7 Espectroscopia de raios-X por Energia Dispersiva – EDX

A EDX é uma técnica simples e econômica, sendo uma técnica qualitativa e quantitativa de composição química de amostras que permite a determinação da composição química das amostras. Foi utilizada 3 amostras para esse ensaio, 1 amostra não magnética com uma granulometria de 325 mesh, 1 amostra sem separação magnética com a granulometria de 325 mesh e 1 amostra magnética com uma granulometria de 100 mesh.

Os resultados das análises de EDX para as amostras 1, 2 e 3, respectivamente são descritos na Tabela 2, é possível constatar a presença de 28 elementos químicos nas três amostras analisadas, denominadas da seguinte forma: Amostra 1 - Material Não-Magnético, Amostra 2 - Material Magnético e Não-Magnético, e Amostra 3 - Material Magnético, ambas contendo uma quantidade de 5g.

Elemento Químico	Característica	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 3 (%)
Silício (Si)	Semimetal	14,770	13,010	0,529
Bromo (Br)	Não Metal Diatômico	16,720	19,200	1,980
Cálcio (Ca)	Metal Alcalinoterroso	11,500	13,510	1,800
Bário (Ba)	Metal Alcalinoterroso	10,230	8,640	6,520
Estanho (Sn)	Metal Pós-Transição	7,050	4,970	7,780
Arsênio (As)	Semimetal	3,480	3,670	-
Cobre (Cu)	Metal De Transição	2,950	3,210	18,350
Chumbo (Pb)	Metal Pós-Transição	1,630	1,140	2,290
Antimônio (Sb)	Semimetal	1,170	1,250	-
Ferro (Fe)	Metal De Transição	0,979	2,480	15,420
Zircônio (Zr)	Metal De Transição	0,384	0,337	0,875
Prata (Ag)	Metal De Transição	0,397	0,444	1,710
Estrôncio (Sr)	Metal Alcalinoterroso	0,296	0,402	0,074
Fósforo (P)	Não Metal Poliatômico	0,114	0,200	-
Nióbio (Nb)	Metal De Transição	0,105	0,063	0,006
Manganês (Mn)	Metal De Transição	0,116	0,085	0,149
Níquel (Ni)	Metal De Transição	0,097	0,445	15,960
Cloro (Cl)	Não Metal Diatômico	0,110	0,059	-
Zinco (Zn)	Metal De Transição	0,077	0,084	0,101
Paládio (Pd)	Metal De Transição	0,062	0,030	-
Ouro (Au)	Metal De Transição	0,050	0,035	0,360
Índio (In)	Metal Pós-Transição	0,039	0,036	-
Molibdênio (Mo)	Metal De Transição	0,012	0,012	0,006
Cromo (Cr)	Metal De Transição	0,012	0,014	0,021
Cobalto (Co)	Metal De Transição	0,006	0,019	0,245
Bismuto (Bi)	Metal Pós-Transição	-	0,021	-
Titânio (Ti)	Metal De Transição	-	-	2,450
Tório (Th)	Actinídeo	-	-	0,144

Tabela 2 – Elementos Químicos presentes nas Memórias RAM.

Fonte: BARRETO, 2023.

Pode-se perceber uma semelhança em grande parte dos elementos químicos presentes na composição da amostra não-magnética e na amostra sem separação



magnética. E também pode-se observar uma divergência quando observa-se os resultados obtidos na amostra magnética, que demonstra a eficiência da separação magnética.

Dentre os elementos presentes pode-se observar a presença de semimetais, metais alcalinoterrosos, metais diatômicos, metais de transição, metais pós-transição, metal poliatômico e actinídeo. Dentre esses, alguns são classificados como metais pesados e se apresentaram em porcentagens diversas.

4. Considerações Finais

A pesquisa obteve sucesso ao atingir os objetivos propostos, identificando e quantificando os elementos químicos presentes nas memórias RAM com o auxílio das análises de MEV-EDS, DRX e EDX. Foram encontrados vários elementos químicos em concentrações diversas, incluindo alguns classificados como metais pesados.

A perda durante o processo de cominuição e separação magnética foi calculada, totalizando 7,798% do material original. A quantidade de elementos presentes nas amostras, incluindo os principais metais como ouro, prata, cobre e ferro, foi determinada com base nas análises de EDX.

Os dez principais elementos químicos identificados na memória RAM, em ordem decrescente de concentração, foram Bromo, Cálcio, Silício, Bário, Estanho, Arsênio, Cobre, Ferro, Antimônio e Chumbo. Essas informações fornecem uma visão detalhada da composição química da memória RAM, o que pode ser relevante para entender suas propriedades e possíveis aplicações comerciais.

Por fim, pode-se concluir que a pesquisa obteve sucesso em identificar e quantificar os elementos químicos presentes nas memórias RAM, demonstrando sua viabilidade. Sendo possível reduzir as memórias RAM com êxito, que resultou na obtenção de amostras tanto magnéticas quanto não-magnéticas.

Referências

ABRAMOVAY, R.; SPERANZA, J. S.; PETITGAND, C., **Lixo zero: gestão de resíduos sólidos para uma sociedade mais próspera**. São Paulo: Planeta sustentável: Instituto Ethos, 2013. 77 p.

AFONSO, J. C., **Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos: O Antropoceno Bate à Nossa Porta**. Revista Virtual de Química. ISSN 1984–6835. Volume 10, Número 6, novembro-dezembro 2018. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Departamento de Química.

BALDÉ *et al.* **The Global E-waste Monitor**, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.

BOSQUESI, R. M.; FERREIRA, R. L., **Lixo eletrônico e seus impactos aos recursos hídricos**. Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade – v.13 n.7 – 2018.



BRASIL, 2010, **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Disponível em: https://www.paranaambiental.com.br/arquivos/files/5_residuos_leifederal.pdf. Acesso em: 05 de outubro de 2021.

BRASIL, 2020, **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>. Acesso em: 05 de outubro de 2021.

BRASIL, 2020 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA). **Descarte de eletroeletrônicos**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/epanb/item/15710-descarte-de-eletroeletr%C3%B4nicos.html>. Acesso em: 20 de maio de 2022.

BRASIL, 2022, **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. LINK: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/decreto/D10936.htm. Acesso em: 02 fev. 2023.

CALDAS *et al.*, **PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO: CARACTERIZAÇÃO E VALOR AGREGADO (PRINTED CIRCUIT BOARDS: CHARACTERIZATION AND ADDED VALUE)**. Revista Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, TMM., vol.16, n2, 203-211p., 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/2176-1523.20191722>. Acesso em: 01 de fev. 2023.

CAMPOS *et al.*, **Multiversos: linguagens: natureza em pauta: ensino médio**. LIVRO, 1. ed. – São Paulo: FTD, 2020.

CUNHA, B. P., AUGUSTIN, S., **Sustentabilidade ambiental [recurso eletrônico]: estudos jurídicos e sociais**. Dados Eletrônicos Caxias do Sul, RS: Educs, 2014. EDUCS – Editora da Universidade de Caxias do Sul, 2014.

DACOREGIO, M. A., **GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS: UMA SOLUÇÃO AMBIENTAL E SOCIAL**. UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA, Tubarão - 2018. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Química Licenciatura da Universidade do Sul de Santa Catarina, 2018. 81f.

NERY, G. P., **Caracterização tecnológica de minérios auríferos por análise automatizada de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura**. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo, 2016. 115p.

NICOLAI, F. N. P. **Mineração urbana: avaliação da economicidade da recuperação de componentes ricos em Au a partir de resíduo eletrônico (e-waste)**. 2016. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2016.



RAJOVIC, K. C. S. **Diretrizes para o gerenciamento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Estudo de caso: Uberaba, MG.** São Carlos: UFSCar, 2016. 150p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, 2016.

SANTANA, G.; MARQUES, P. R. B. O. **Resíduo eletrônico e suas implicações ambientais: diagnóstico sobre o tema em uma instituição de ensino tecnológico.** Ensino e Multidisciplinaridade. V-3, n. 2, p.75-92, 2017.

SANTOS, M. C. M. **O tratamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na política nacional de resíduos sólidos.** REDES – REVISTA ELETRÔNICA DIREITO E SOCIEDADE, Canoas, vol.4, n. 2, p. 257–276, 2016.

TEIXEIRA, M., **Estudo de caracterização e desenvolvimento tecnológico dos materiais duros cimentados da mina de fosfato da Copebrás, GO.** UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas. Dissertação de Mestrado, 2019. 162 f.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso.** Tese de doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 115f.

XAVIER *et al.*, **Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos.** Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021. 198 p. ISBN: 978-65-5919-059-1.

XAVIER *et al.*, **Diagnóstico da mineração urbana dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil: Projeto MINARE: relatório final.** – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2023. 38 p. ISBN: 978-65-5919-042-3.

YAMANE, L. H., **Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico.** 2012. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-07062013-154359/pt-br.php>. Acesso em: 05 de setembro de 2022.



Circularidade da cadeia de equipamentos eletrônicos: desafios e ações para sua consolidação

Machado, Márcia Cristina^{1*}; Carvalho, Tereza Cristina M. B.²

¹ Universidade de São Paulo; ² Universidade de São Paulo

*macrismachado@usp.br

Resumo

O aumento expressivo dos resíduos eletrônicos gerados anualmente tornou-se uma questão de ordem pública, que requer ações de gerenciamento e direcionamento eficientes e urgentes. A gestão desses resíduos perpassa pelo estabelecimento de leis e diretrizes que definem as responsabilidades pela destinação correta dos resíduos, bem como por políticas de incentivo que fomentem o reaproveitamento dos equipamentos eletrônicos, evitando-se o descarte inadequado. Neste sentido, este estudo exploratório buscou identificar por meio da revisão da literatura, quais as práticas e mecanismos são empregados na gestão e destinação dos resíduos eletrônicos. Como resultado identificou-se que para fazer frente a estes desafios, a circularização da economia vem sendo empregada como mecanismo de transformação do problema em oportunidades, gerando novos modelos de negócios, incentivando o prolongamento da vida útil dos equipamentos, e fomentando o desenvolvimento de novas tecnologias que aprimorem os processos de reciclagem deste tipo de resíduo. Empregando a metodologia de estudo de caso, avaliou-se os impactos da aplicação dos conceitos da economia circular e da gestão de resíduos eletrônicos em um centro de coleta instalado no campus da Universidade de São Paulo. Como resultado observou-se que o volume de resíduo coletado e destinado mensalmente vem crescendo, assim como a quantidade de equipamentos com prolongamento da vida útil também, e que a digitalização dos processos neste centro poderá melhorar os controles, aumentar a disponibilidade de recebimento e destinação de equipamentos, bem como gerar informações e indicadores mais precisos para os gestores.

Palavras-chave: Descarte; Economia Circular; Lixo eletrônico; Reciclagem; Reuso.

1. Introdução

Segundo a Agência Brasil de notícias, o Brasil figura na quinta posição no ranking mundial de geradores de lixo eletrônico, tendo descartado em 2019 mais de 2 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos. Apesar do país contar com legislação que trata o tema (Lei 12.305/2010), o descarte incorreto do resíduo eletrônico permanece como uma triste realidade, que contamina o solo, as águas, expondo a população mais vulnerável que sobrevive nas proximidades dos lixões, a contaminações e doenças (FRANCO et al., 2021).

São classificados como resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) os equipamentos de informática, os equipamentos de cuidados médicos, as máquinas de



automação de negócio, as máquinas de jogos eletrônicos, os instrumentos/equipamentos de monitoramento e controle, e os equipamentos eletroeletrônicos domésticos (THUKRAL; SHREE; SINGHAL, 2022). O descarte correto do “lixo eletrônico” possibilita a remanufatura, a reutilização de peças para manutenção em outros equipamentos, e ao final da linha a reciclagem (KIRKPATRICK, 2020).

O aumento do volume de REEE tem sido observado em todo o planeta, e segundo o relatório trienal da *United Nations Institute for Training and Research* (Unitar), dado o avanço das tecnologias da informação e comunicação nos setores de transporte elétrico, produção de energia limpa e cidades inteligentes que baseiam seu funcionamento nos equipamentos eletroeletrônicos e nos sensores, denota a urgência no estabelecimento de políticas públicas regionais e globais que viabilizem a coleta, e definam e/ou fomentem a correta destinação dos resíduos eletrônicos (FORTI et al., 2020; SEIF; SALEM; ALLAM, 2023).

O REEE consta nos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecido em 2015 pelas Nações Unidas, especificamente no ODS11-Cidades sustentáveis por meio do indicador 11.6.1 (Percentual de resíduos sólidos urbanos coletados regularmente e com destinação final adequada em relação ao total de resíduos gerados pela cidade.), no ODS12 – Consumo e produção responsáveis, tendo como indicadores 12.4.2 (Tratamento de resíduos, geração de resíduos perigosos e gestão de resíduos perigosos, discriminados por tipo de tratamento) e 12.5.1 (Taxa nacional de reciclagem e toneladas de material reciclado (subindicador de lixo eletrônico → total de resíduos eletrônico reciclado / total de resíduo eletrônico gerado)). (FORTI et al., 2020; ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2015)

As abordagens de reciclagem de REEE têm encontrado na logística reversa algum direcionamento, dado que as indústrias passaram a receber os produtos descartados pelos consumidores em postos de coletas específicos, e em alguns casos, o produto é retirado na casa do consumidor final, quando da entrega de um novo produto. Entretanto estas práticas ainda são pouco aplicadas (GREEN ELETRON, 2021; SHITTU; WILLIAMS; SHAW, 2021).

Quanto ao gerenciamento de REEE coletado por cooperativas de catadores ou mesmo em pontos de coleta, segundo (BERNARDO; DE SOUZA; DEMAJOROVIC, 2020) existem dificuldades na identificação dos equipamentos, uma vez que a etiquetagem destes se perde ao longo do uso, e as informações de rastreamento que poderiam compor um sistema integrado de gerenciamento destes resíduos, fica comprometida.

Para fomentar o gerenciamento de REEE, a adoção da economia circular vem se destacando como alternativa, por ter suas bases no prolongamento da vida útil dos produtos, na aplicação do ecodesign que favoreça a reciclagem, e um ciclo de vida que considere o reuso e/ou remanufatura dos produtos, bem como a criação de modelos de negócios de sistemas de serviços de equipamentos ao invés de venda dos produtos (PARAJULY et al., 2020; XAVIER; OTTONI; LEPAWSKY, 2021).

Segundo pesquisa realizada pela *Green Electron* em 2021, a maioria das pessoas ainda tem dificuldades em entender o que são REEEs e quais as formas corretas de descarte destes resíduos. Diante desta constatação, e considerando que os REEEs apresentam índices inferiores a 5% de reciclagem, promover a conscientização da população sobre a importância do descarte correto deste tipo de resíduo torna-se urgente e relevante.



Considerando que o tratamento e disposição correta de REEE figuram como uma das metas dos ODSs, e que a ausência de um sistema que auxilie no gerenciamento da destinação destes resíduos também contribui para o aumento da poluição, surge a questão de pesquisa que norteia este estudo – ***A adoção da digitalização do processo de gestão dos resíduos eletroeletrônicos poderá contribuir para o aumento do volume de equipamentos destinados ao reuso?***

Neste estudo empregou-se como método a pesquisa exploratória. Para tanto, foram realizadas pesquisas nas bases de dados acadêmicas IEEE, Scopus e Google Scholar, a fim de identificar trabalhos relacionados que abordam os temas resíduos eletrônicos e economia circular, para compor uma base teórica confiável, eliminando a subjetividade dos pesquisadores (KITCHENHAM et al., 2009) e fornecendo subsídios para análise do estudo de caso proposto (YIN, 2014). A coleta de dados realizada para este estudo contou com buscas eletrônicas no site do Governo do Brasil para identificar as leis que suportam o tratamento dos resíduos eletroeletrônicos, e entrevistas com o gestor da unidade de análise utilizada no estudo de caso (GARCÍA-MIRELES et al., 2018).

2. Desenvolvimento da Pesquisa

2.1 Resíduo de Equipamentos Eletroeletrônicos – descarte e seus impactos

A geração de REEE tornou-se o maior desafio dos países em desenvolvimento, e no Brasil a situação requer atenção, políticas públicas eficazes e participação da sociedade como parte integrante da solução. O volume de resíduo eletrônico gerado no Brasil, segundo levantamento realizado pelas Nações Unidas foi superior a 2 milhões de toneladas em 2019 (GREEN ELETRON, 2021).

Este cenário foi drasticamente acentuado durante o período da pandemia da COVID-19, quando as empresas destinaram para a casa de seus funcionários equipamentos de informática e de comunicação para manter suas operações, assim como as escolas exigiram de seus alunos o uso de equipamentos ou smartphones para ministrar aulas remotamente (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

Entende-se por resíduo eletrônico os equipamentos eletroeletrônicos e suas partes, os cabos e fios de telecomunicações que foram descartados pelo proprietário por considerá-los obsoletos e/ou sem utilidade (WERNECK DE FARIA BARROS GALVÃO et al., 2021).

Estes resíduos quando descartados de forma incorreta geram impactos ambientais severos, como contaminação do solo e da água, devido aos componentes tóxicos e metais pesados que são utilizados em sua fabricação, bem como plástico e metais nobres utilizados em sua estrutura (FRANCO et al., 2021).

Para fazer frente aos impactos causados pelo descarte inadequado de REEE, o Governo do Brasil estabeleceu por meio do decreto de lei número 10.240, normas para a logística reversa desses equipamentos e seus componentes, com o objetivo de estruturar o processo de coleta e destinação correta desses resíduos (BRASIL, 2020).

Buscando o alinhamento com a legislação, o acordo setorial vinculado ao Plano Nacional de Resíduos Sólidos tem sido aplicado com relativo sucesso no mercado corporativo (BRASIL, 2022). Contudo, as empresas que destinam seus resíduos para empresas de



tratamento de REEE, nem sempre se atentam se a destinação final será para reciclagem, aproveitamento de partes para remanufatura ou reuso (AKIO et al., 2016).

Ao mesmo tempo, observa-se que mesmo após a publicação do referido decreto, o descarte correto de REEE ainda permanece muito aquém do esperado, mostrando baixa conscientização da sociedade sobre os impactos gerados pelos resíduos, conforme apurou a pesquisa realizada pela *Green Eletron* em 2021, na qual observou-se que 1/3 dos entrevistados afirmaram desconhecer os procedimentos relacionados aos descarte correto de REEE (GREEN ELETRON, 2021).

Este cenário se reflete no acordo setorial do mercado de bens de consumo, que ainda é bastante rudimentar - falta conscientização e clareza dos canais para o descarte. A coleta desses resíduos muitas vezes é realizada por catadores, do mesmo modo como observado em outros países em desenvolvimento (M. WAGNER et al., 2022), decorrendo em outro desafio, que é a integração dos catadores nessa cadeia com devido treinamento.

Esta ausência de entendimento sobre o descarte correto foi observado por (IKHLAYEL, 2018) que aborda também os processos rudimentares empregados para reciclagem de equipamentos eletrônicos em países como China, Paquistão, e Índia. (LAMA et al., 2022) aponta que os problemas mais frequentes relacionados aos REEEs referem-se à geração dos resíduos, a reciclagem informal, ao fluxo dos resíduos, e aos impactos causados à saúde da população e ao meio ambiente.

Como consequência do aumento da produção e da aquisição de produtos eletrônicos observa-se o crescente processo de mineração urbana que consiste no processamento de REEE de maneira formal e controlada, na qual são extraídos os minérios mais valiosos, reduzindo consideravelmente a extração dos minérios de terras raras do solo (extração primária) que são utilizados na fabricação desses produtos (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

A mineração urbana aliada aos processos de descarte adequado, reciclagem e reuso de REEE convergem para a implementação de uma economia circularizada, com a qual objetiva-se minimizar os impactos gerados pelo descarte incorreto dos equipamentos eletroeletrônicos, evitando-se que estes dispositivos sejam dispostos em lixões ou aterros (SHARMA; JOSHI; KUMAR, 2020).

2.2 Economia Circular dos equipamentos eletroeletrônicos

A economia circular consiste no processo de criação de um ecossistema fechado no qual busca-se o consumo eficiente por meio do uso e reuso dos recursos, empregando a reciclagem, a remanufatura e o aproveitamento dos resíduos para geração de novos produtos, reduzindo ao máximo a necessidade de extrair matéria prima do meio-ambiente, e estendendo a vida útil dos produtos utilizando-se de tecnologias limpas, inovadoras e sustentáveis (BARAPATRE; RASTOGI, 2022).

Neste sentido, a produção de equipamentos eletroeletrônicos mais sustentáveis pode empregar técnicas como ecodesign, eficiência energética, gerenciamento da cadeia logística, entre outras. Estes mecanismos amparados por políticas públicas de incentivo aos processos produtivos sustentáveis podem contribuir para a melhoria do gerenciamento de REEE (PARAJULY et al., 2020; SHARMA; JOSHI; KUMAR, 2020).

A adoção da economia circular dos produtos eletroeletrônicos no Brasil encontra-se em processo inicial, em parte pela baixa adesão das pessoas aos processos corretos de



descarte, bem como no comportamento de consumo e tendência de estocar equipamentos considerados ultrapassados e sem uso (PARAJULY et al., 2020; XAVIER; OTTONI; LEPAWSKY, 2021).

Por outro lado, as indústrias seguem regulamentações federais que versam sobre a logística reversa e a disponibilização de pontos de coletas de produtos descartados pelos consumidores, contribuindo para o aumento da destinação correta de REEE (WERNECK DE FARIA BARROS GALVÃO et al., 2021). Todavia o percentual de resíduo a ser coletado pelas indústrias, conforme estabelecido na legislação brasileira (Lei dos Resíduos Sólidos) chegará a 17% do volume comercializado aos consumidores finais em 2025, denotando que o país ainda tem um longo caminho a percorrer para estabelecer uma economia circular no setor de eletrônicos (XAVIER; OTTONI; LEPAWSKY, 2021).

Como alternativa para expandir a circularização da economia, (ANTTONEN et al., 2018) sugerem a adoção de um sistema de hélice tripla - governo, indústria e universidades, no qual políticas públicas apoiam as empresas que adotam modelos produtivos sustentáveis, e as universidades desenvolvem processos inovadores para implantação da circularidade nas indústrias. Deste modo, o ciclo de vida do produto passa a agregar o conceito da circularidade desde a concepção e/ou design até o fim-da-vida útil e a consequente reciclagem para geração de novos produtos (YANG et al., 2023).

Dentre os modelos de negócios circulares, a remanufatura de produtos e os produtos comercializados como serviços destacam-se pelo potencial econômico e sustentável, dado que nestes modelos a vida útil dos produtos tende a ser prolongada, evitando-se assim o uso de recursos escassos. Todavia estudos recentes apontam que a pouca atenção dispensada ao ciclo de vida dos produtos eletrônicos, em especial ao fim de vida, apresenta-se como uma barreira a ser eliminada para expansão desses modelos de negócios (PARAJULY et al., 2020).

2.3 Reuso, Remanufatura e Reciclagem

A gestão dos resíduos sólidos, em especial os eletrônicos, encontra-se na pauta mundial dos governos e das empresas, devido ao volume de aquisição de novos equipamentos e o consequente descarte de equipamentos antigos (LAMA et al., 2022). Quando observados os processos adequados de descarte, reuso e reciclagem esses resíduos podem se transformar em fonte de recursos valiosos nos processos industriais (NAIK; SATYA ESWARI, 2022).

Uma das abordagens de reuso dos REEEs, refere-se à aplicação de algumas etapas de manutenção ou mesmo de processos industriais de remanufatura, nas quais são realizadas trocas ou substituição de peças ou partes com defeitos ou obsoletos viabilizando a continuidade do uso e prolongando a vida útil dos equipamentos, evitando-se o descarte ou geração de resíduo eletrônico disposto em lixões ou aterros sanitários (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

Dentre os REEEs com maior valor encontram-se as placas de circuito impresso, pois possuem em sua composição metais preciosos como ouro, prata e cobre, além de minerais como terras raras. Todavia os processos comuns de reciclagem que consistem em separação mecânica e trituração não são adequados para este tipo de material, motivo pelo qual muitas vezes estas placas são queimadas a céu aberto gerando contaminação do ar, e



causando sérios danos à saúde das pessoas que realizam o processo (FRANCO et al., 2021; NAIK; SATYA ESWARI, 2022).

Apesar da reciclagem ser um processo preferível ao se comparar com o descarte do REEE em aterros ou lixões, o processo de reciclagem adequada dos eletrônicos requer além de tecnologia e maquinário adequado, políticas públicas de incentivo a logística reversa, bem como maior divulgação sobre os impactos que estes resíduos causam a saúde das pessoas e ao meio ambiente (JAUNICH et al., 2020).

2.4 Impactos sociais do reuso de equipamentos eletroeletrônicos

O processo de reuso de equipamentos eletroeletrônicos tem sua origem no descarte correto destes em pontos de coleta ou entidades que recebem estes materiais e promovem o prolongamento da vida útil e/ou a destinação adequada (LEITE, 2020). Ocorre que quando um dispositivo eletrônico é descartado de forma inadequada, ou ainda quando o processo de reciclagem ocorre de maneira inapropriada, pode causar danos à saúde das pessoas, bem como gerar poluição ao meio ambiente (NAIK; SATYA ESWARI, 2022).

Por outro lado, quando a destinação dos REEEs é realizada de modo assertivo, seja por meio da logística reversa, pontos de coleta ou campanhas de arrecadação de equipamentos esquecidos, possibilita que alguns dispositivos de informática passem por processos de manutenção ou de remanufatura (MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

A remanufatura e/ou manutenção dos equipamentos de informática viabilizam a disponibilização para uso em escolas, entidades assistenciais, órgãos públicos, possibilitando a inclusão das pessoas carentes e/ou em situação de vulnerabilidade (LEITE, 2020).

3. Estudo de Caso

O Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (CEDIR) atua desde 2010 como um polo de recebimento de equipamentos eletroeletrônicos descartados pelos departamentos da Universidade de São Paulo, por empresas, e cidadãos. Todos os equipamentos e/ou materiais de informática entregues ao CEDIR passam por um processo de separação, avaliação, e encaminhamento adequado.

O CEDIR possui como diretriz a economia circular que preconiza o reaproveitamento dos equipamentos e materiais a eles associados, destinando o mínimo possível para empresas capacitadas na reciclagem de REEE. No CEDIR promove-se o reuso de computadores no estado (computadores que chegam em bom estado e que muitas vezes precisam de algum reparo ou expansão de memória) e remanufatura, produzindo computadores de 2ª mão que são destinados para reuso.

3.1 Operação do CEDIR

O CEDIR tem uma operação com características industriais, ou seja, entrada de materiais, armazenamento, processo produtivo (análise, separação, manutenção), e distribuição/destinação. Estes processos são realizados por uma equipe reduzida, que tem suas tarefas distribuídas conforme suas habilidades e conhecimentos técnicos.

As operações do CEDIR estão organizadas em 3 grupos – recepção, separação e destinação, cada qual com atividades específicas e complementares, preservando as características de reaproveitamento dos equipamentos e/ou materiais, prolongando a vida útil, conforme apresenta o fluxograma da Figura 1.



No grupo Recepção encontram-se as atividades de registro das solicitações de entrega de equipamentos realizadas pelos departamentos da USP, por empresas públicas ou privadas, e pelos cidadãos, e o recebimento dos equipamentos e/ou materiais indicados nas solicitações encaminhadas anteriormente.

No grupo Separação são realizadas as atividades de separação, armazenamento, análise e manutenção. A separação consiste na identificação do tipo de equipamento e/ou material para armazenar nos paletes de entrada, até a etapa de análise/avaliação. As avaliações são realizadas pelos técnicos do CEDIR, que verificam se o equipamento ainda pode ser utilizado, ou se somente as peças/componentes serão reutilizadas em outros equipamentos, ou ainda se o equipamento e/ou material deve ser encaminhado para reciclagem.

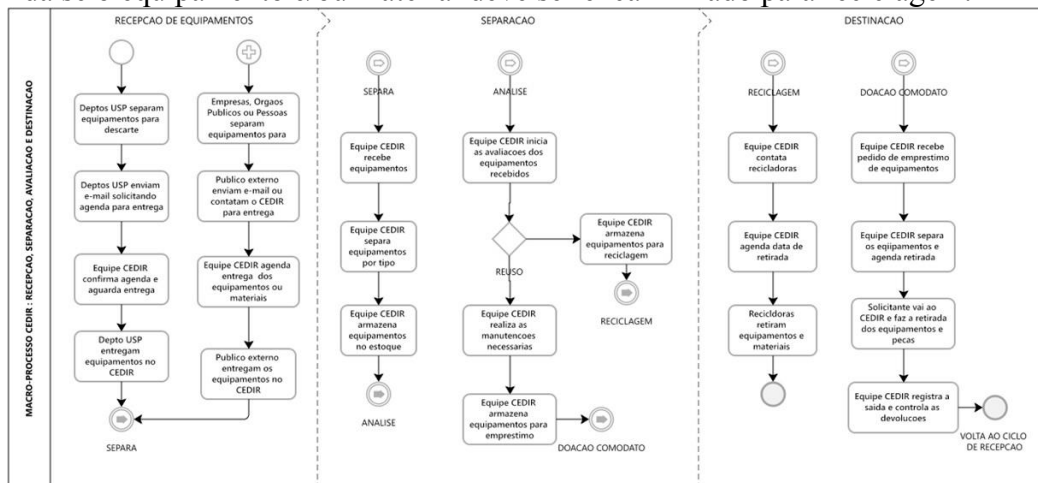


Figura 1 - Fluxograma da Operação do CEDIR

Fonte: elaborado pelas autoras

Após as análises os equipamentos, componentes ou partes são separados e organizados por categoria de destinação. Nas atividades de manutenção, os equipamentos que foram identificados como “de reuso”, serão testados, limpos, ajustados, classificados e armazenados no estoque de equipamentos disponíveis para reuso.

No grupo Destinação são realizadas as atividades de envio para reciclagem, e envio para reuso. As atividades de envio para reciclagem consistem no contato com as empresas recicladoras para o agendamento de retirada dos equipamentos e materiais que serão destinados a estas empresas. Já as atividades de envio para reuso refere-se a entrega de equipamentos, partes ou peças aos departamentos da USP, as escolas, aos órgãos públicos, às ONG ou entidades sociais que formalizaram pedidos de equipamentos junto ao CEDIR.

Todas as atividades realizadas no CEDIR geram registros que possibilitam analisar as quantidades de materiais recebidos, de equipamentos reutilizados ou remanufaturados, e de peças disponibilizadas para centros de pesquisa e manutenção de equipamentos nos campi da USP, e finalmente quantidade de material e/ou equipamentos destinados aos parceiros que executam a destinação adequada destes REEES.

Quanto as peças e/ou partes dos dispositivos que ficam disponíveis para os pesquisadores da Universidade, o processo atual de solicitação e entrega ocorre em parte no formato digital e em parte no formato analógico. Os requisitantes encaminham uma solicitação do material que necessitam, e a equipe CEDIR verifica a disponibilidade no estoque do



material. Existindo o material (peça ou partes) no estoque, a equipe CEDIR informa ao requisitante e agenda a data para retirada.

Já os equipamentos de informática, que após serem avaliados e passarem por manutenção são identificados como adequados para reuso, ficam disponíveis para empréstimo aos departamentos da USP, às escolas públicas e projetos sociais. Os empréstimos são realizados por meio de solicitação encaminhada ao CEDIR, são registrados e sua entrega devidamente formalizada.

Destinação em números

Os levantamentos realizados junto ao gestor do CEDIR, apontaram que nos últimos meses houve aumento na quantidade de equipamentos e materiais recebidos no CEDIR, tanto os entregues pelas pessoas, quanto aqueles entregues pelos departamentos da USP e outras entidades públicas. Este aumento no recebimento de REEE resultou na destinação para Reuso, de equipamentos de informática (microcomputadores pessoais com seus acessórios, notebooks e tablets) que foram enviados para escolas e ONGs que realizaram pedido de equipamentos para uso por alunos e/ou jovens.

A volumetria de equipamentos destinados para reuso registrada nos últimos meses foi, em média, de 80 equipamentos mensais, com saídas semanais de 20 equipamentos.

Quanto ao volume da destinação dos REEEs que foram recebidos, separados e avaliados, e identificados como resíduos a serem destinados para Reciclagem, observou-se que, em média, foram apontados envio de 7,5 toneladas mês.

Estes números indicam, conforme relatado pelo gestor da equipe CEDIR, uma tendência de maior disposição das pessoas e das entidades em substituir seus equipamentos e dar a destinação correta aos equipamentos de informática e dispositivos. Ainda segundo o gestor, “durante o período de pandemia, as pessoas utilizaram os equipamentos que possuíam, dado a necessidade de trabalhar em casa. Agora as pessoas estão trocando seus equipamentos e dispositivos para melhorar suas experiências”.

3.2 Solução Proposta

Para aprimorar a velocidade e o controle dos processos de recebimento, avaliação, manutenção, atendimentos de solicitações e disponibilização destes equipamentos para reuso, propõem-se a implementação da digitalização dos processos realizados pela equipe CEDIR. Esta proposta encontra amparo nos estudos apresentados por (BAKER; STEHR; HANDMANN, 2023) que propuseram a digitalização do processo de gestão de REEE como mecanismo de melhora na destinação e uso desses resíduos.

A digitalização dos agendamentos de entrega de equipamentos e materiais de informática, e das solicitações de equipamentos ou componentes, bem como do envio dos equipamentos e materiais (componentes) para as recicladoras possibilita agilidade, conferindo ao processo maior visibilidade. A digitalização possibilita também o aprimoramento do controle de estoque de equipamentos e componentes que são destinados para uso nos departamentos de pesquisa da Universidade, para uso em escolas e projetos sociais que atendem crianças e jovens.

No que diz respeito aos materiais recebidos no CEDIR e que devem ser destinados para reciclagem, ou para os fabricantes ou parceiros, os registros de pesagem, identificação do material, registro do destinatário também poderá ser realizado no formato digital, com a emissão dos devidos documentos e registros necessários para o envio dos materiais.



Quanto a gestão do estoque dos equipamentos e dispositivos recebidos pela equipe do CEDIR, os registros de entrada, definição do local de armazenamento físico, resultado das análises técnicas, e destinação podem ser aprimorados utilizando os dados contidos nos registros de entrada e vinculando a estes registros a jornada do equipamento dentro do CEDIR.

4. Resultados e Discussão

A problemática gerada pelo aumento no volume de REEE exige dos governos, empresas e sociedade ações conjuntas com o objetivo de reduzir a geração de resíduos, e dar a destinação correta para os materiais e equipamentos em fim de vida, conforme observado nos estudos utilizados como fonte para elaboração deste artigo (GAYATHRI; AMIRTHARAJAN; PRAVINKUMAR, 2023; SRINIVASAN et al., 2022).

Neste sentido a lei de resíduos sólidos e seus complementos servem como norteador ajudando as empresas e os governos na tomada de decisão sobre as estratégias para reduzir a geração de resíduos (BRASIL, 2020; PRESIDENCIA DA REPUBLICA DO BRASIL, 2018).

Ao mesmo tempo a população, mesmo tendo conhecimento da existência de locais apropriados para o descarte, dispõem seus equipamentos eletrônicos junto com os resíduos sólidos domésticos comuns, ou armazenam em suas casas os equipamentos eletrônicos obsoletos por longos períodos de tempo (GREEN ELETRON, 2021; THUKRAL; SHREE; SINGHAL, 2022).

Durante o período da pandemia houve um aumento na aquisição de equipamentos de informática para suportar as atividades remotas das empresas e das escolas, e considerando-se a frequência de troca de equipamentos, espera-se um aumento no volume do descarte de equipamentos de informática nos próximos anos (BALDÉ et al., 2022; GAYATHRI; AMIRTHARAJAN; PRAVINKUMAR, 2023).

Buscando reduzir o volume de REEE, a União Europeia tem fomentado a implantação da circularização da economia, por meio de programas de incentivo a logística reserva, companhias de conscientização e atuando junto a indústria para criação de produtos sustentáveis em todo ciclo de vida (GHISELLINI; PASSARO; ULGIATI, 2023; MURTHY; RAMAKRISHNA, 2022).

No Brasil a legislação suporta os processos de logística reserva e destinação de resíduos sólidos, todavia ainda faltam campanhas de esclarecimentos e conscientização da população sobre o tema, e maiores incentivos para indústria e comércio varejista (LIU et al., 2020). Neste sentido, o aumento da conscientização da população, aliado aos processos de remanufatura e prolongamento da vida útil, e o desenvolvimento de novas tecnologias para reciclagem eficiente dos produtos eletrônicos podem contribuir para suplantar as atuais barreiras da logística reversa e da circularização da economia (CARVALHO, 2012; SUNDAR et al., 2023).

O estudo de caso do CEDIR mostrou que o gerenciamento adequado de REEE, a comunicação e a participação da população na destinação correta dos equipamentos de informática, possibilitam que toneladas de resíduos eletrônicos sejam reutilizados, remanufaturados ou reciclados, evitando-se a contaminação do solo e das águas, e os consequentes impactos a saúde da população exposta aos agentes poluidores contidos nos resíduos.



No CEDIR o tratamento e destinação dos REEEs geram benefícios para a sociedade, por meio do prolongamento da vida útil dos equipamentos; mitigam os impactos ao meio ambiente com a destinação correta dos materiais no fim-da-vida; e geram insumos para remanufatura ou mesmo na fabricação de novos produtos, por meio da reciclagem.

A digitalização dos processos realizados no CEDIR proposta neste estudo, assim como já observado em outros centros de coleta de resíduos eletrônicos (LIU et al., 2020), contribui para aprimorar os controles dos equipamentos e materiais recebidos, bem como para acelerar os processos de destinação para reuso em escolas e entidades assistenciais e ONG, para remanufatura dos equipamentos, ou ainda para reciclagem.

5. Considerações Finais

A circularidade dos REEEs ainda apresenta muitos desafios, mas a sua aplicação traz benefícios de grande relevância em termos de proteção do meio ambiente e tem potencialidade para contribuir com a inclusão social. Dentre os diversos desafios, destacam-se a necessidade de conscientização da população e do setor empresarial sobre a importância do descarte correto dos equipamentos eletrônicos para proteção do meio ambiente e promoção de ações de inclusão social. Aliada a esse processo de educação ambiental é importante ampliar a disseminação de locais de pontos de coleta de REEE.

No caso específico do setor empresarial, a nova demanda de mercado para práticas sustentáveis pode ser atendida se empresas encaminharem seus resíduos eletrônicos para instituições que atuem com iniciativas socioambientais, como é caso do CEDIR, exemplificado no artigo.

Outro desafio muito importante no caso do mercado brasileiro diz respeito a destinação e tratamento adequado das placas de circuito impresso. No Brasil, existem indústrias de reciclagem de plástico, metais como ferro e alumínio bastante presentes em computadores, cabos e outros. As placas de circuito impresso todavia são exportadas para reciclagem e retirada de metais, dentre eles metais preciosos como o ouro, a prata e platina de alto valor. Assim temos um fluxo de placas saindo do país que possuem metais de grande valia.

Em termos de pesquisa, no Brasil existem diversas instituições que desenvolveram métodos para retirada de metais das placas, contudo existe necessidade de incentivo do governo e investimento para que indústrias deste setor sejam estabelecidas no país.

No que concerne aos benefícios, é claro que a destinação correta dos REEE protege o meio ambiente, já que esse tipo de resíduo possui muitos metais pesados que são maléficos para a natureza e a saúde do homem. Mas além disso, o fato de se conseguir reciclar as placas de circuito impresso, por exemplo, com a retirada de metais preciosos usados em diversas cadeias produtivas evita que esses metais sejam retirados de minas nativas.

O reuso de equipamentos em bom estado ou remanufaturado abre um outro mercado de equipamentos de 2ª. mão com custos mais acessíveis, podendo atender a demanda de pessoas de menor poder aquisitivo que querem estudar e ou trabalhar remotamente, criando oportunidades de melhoria social.

Neste sentido a digitalização das atividades realizadas no CEDIR que viabilizam o prolongamento da vida útil de equipamentos de informática, e contribuem positivamente para a inclusão digital de crianças, jovens e adultos matriculados em escolas públicas ou atendidos por projetos sociais inclusivos, poderá ser potencializada abrangendo um número maior de beneficiados.



Ao mesmo tempo, o aprimoramento dos controles da destinação adequada dos resíduos eletroeletrônicos para reciclagem e/ou remanufatura, que contribuem para redução do volume de resíduos que anualmente são dispostos em lixões ou aterros sanitários, possibilitam a geração de indicadores que podem servir como direcionamento para campanhas de conscientização e de destinação correta dos resíduos eletroeletrônicos.

Referências

- AKIO, Walter et al. Projeto Eco-Eleto : segurança , renda e Realização Pessoal Através da Destinação Adequada de REEEs. **Anais II Cong. Int. Uma Nova Pedagogia para a Sociedade Futura**, p. 429–437, 2016. Disponível em: <https://reciprocidade.emnuvens.com.br/novapedagogia/article/view/181>.
- ANTTONEN, Markku; LAMMI, Minna; MYKKÄNEN, Juri; REPO, Petteri. Circular economy in the Triple Helix of innovation systems. **Sustainability (Switzerland)**, v. 10, n. 8, p. 1–14, 2018. DOI: 10.3390/su10082646.
- BAKER, Nermeen Abou; STEHR, Jonas; HANDMANN, Uwe. E-Waste Recycling Gets Smarter with Digitalization. **2023 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2023**, p. 205–209, 2023. DOI: 10.1109/SusTech57309.2023.10129536.
- BALDÉ, C. P.; ANGELO, E. D.; LUDA, V.; DEUBZER, O.; KUEHR, R. **Global transboundary e-waste flows monitor 2022** 2022.
- BARAPATRE, Sheetal; RASTOGI, Mansi. e-Waste Management: A Transition Towards a Circular Economy. **Handbook of Solid Waste Management: Sustainability through Circular Economy**, n. May, p. 1499–1521, 2022. DOI: 10.1007/978-981-16-4230-2_68.
- BERNARDO, Odair Oliveira; DE SOUZA, Maria Tereza Saraiva; DE MAJOROVIC, Jacques. Innovation in the reverse supply chain of electrical and electronic waste: A study on information systems and tracking technologies. **RAE Revista de Administração de Empresas**, v. 60, n. 4, p. 248–261, 2020. DOI: 10.1590/S0034-759020200402.
- BRASIL. **Plano nacional de resíduos sólidos (PLANARES)**. Disponível em: <https://sinir.gov.br/>.
- BRASIL, República Federativa Do. **decreto-10.240-residuos eletronicos.pdf**, 2020.
- CARVALHO, Tereza Cristina Melo de Brito. **Os benefícios e os desafios da Economia Circular aplicada ao Setor de Equipamentos Eletroeletrônicos**. 2017
- FORTI, Vanessa et al. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, Flows, and the circular economy potential**, United Nations University. 2021.
- FRANCO, Adriana dos Santos; MOREIRA, Cleumar da Silva; NASCIMENTO, Velber Xavier; MIRANDA, Paulo Rogério Barbosa De; CABRAL, Adriane Borges. Danos causados à saúde humana pelos metais tóxicos presentes no lixo eletrônico. **Diversitas Journal**, v. 6, n. 2, p. 2025–2039, 2021. DOI: 10.17648/diversitas-journal-v6i2-1626.
- GARCÍA-MIRELES, Gabriel Alberto; MORAGA, M^a Ángeles; GARCÍA, Félix; CALERO, Coral; PIATTINI, Mario. Interactions between environmental sustainability goals and software product quality: A mapping study. **Information and Software Technology**, v. 95, n. October 2017, p. 108–129, 2018. DOI: 10.1016/j.infsof.2017.10.002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2017.10.002>.
- GAYATHRI, B.; AMIRTHARAJAN, R.; PRAVINKUMAR, Padmapriya. Does COVID Pandemic raise E-waste to a larger number? - Analysis and Prediction. **2023 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2023**, p. 1–5, 2023. DOI: 10.1109/ICCCI56745.2023.10128208.
- GHISELLINI, Patrizia; PASSARO, Renato; ULGIATI, Sergio. Environmental and Social Life Cycle Assessment of Waste Electrical and Electronic Equipment Management in Italy According to EU Directives. **Environments**, v. 10, n. 7, p. 106, 2023. DOI: 10.3390/environments10070106.
- GREEN ELETRON. **ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL - 2021 Sumário**. 2021.
- IKHLAYEL, Mahdi. An integrated approach to establish e-waste management systems for developing countries. **Journal of Cleaner Production**, v. 170, p. 119–130, 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.09.137. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.137>.
- JAUNICH, Megan Kramer; DECAROLIS, Joseph; HANDFIELD, Robert; KEMAHLIOGLU-ZIYA, Eda; RANJITHAN, S. Ranji; MOHEB-ALIZADEH, Hadi. Life-cycle modeling framework for electronic waste recovery and recycling processes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, n. March, p. 104841, 2020. DOI: 10.1016/j.resconrec.2020.104841. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104841>.
- KIRKPATRICK, Keith. Reducing and eliminating e-waste. **Communications of the ACM**, v. 63, n. 7, p. 17–19, 2020. DOI: 10.1145/3398390.
- KITCHENHAM, Barbara; PEARL BRERETON, O.; BUDGEN, David; TURNER, Mark; BAILEY, John; LINKMAN, Stephen. Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. **Information and Software Technology**, v. 51, n. 1, p. 7–15, 2009. DOI: 10.1016/j.infsof.2008.09.009. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>.
- LAMA, Aditya; VISHNOI, Vibhor Kumar; KUMAR, Krishan; KUMAR, Brajesh; SAINI, Ashish. E-waste, a Global



- Challenge: Its Management and Impact on Public Health in India. **2022 International Conference on 4th Industrial Revolution Based Technology and Practices, ICFIRTP 2022**, p. 25–29, 2022. DOI: 10.1109/ICFIRTP56122.2022.10063211.
- LEITE, Mara Dutra. **Belo Horizonte - Computer reconditioning centre**. 2020.
- LIU, Guangfu; XU, Yi; TIAN, Tingting; WANG, Tao; LIU, Yang. The impacts of China's fund policy on waste electrical and electronic equipment utilization. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, 2020. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119582.
- M. WAGNER; C.P. BALDÉ; V. LUDA; I. C. NNOROM; R. KUEHR; G. IATTONI. **REGIONAL E-WASTE MONITOR for Latin-America, results for the 13 countries participating in project UNIDO-GEF 5554 2022**. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2022/01/REM_LATAM_2022_ENG_Final.pdf.
- MURTHY, Venkatesha; RAMAKRISHNA, Seeram. A Review on Global E-Waste Management: Urban Mining towards a Sustainable Future and Circular Economy. **Sustainability (Switzerland)**, v. 14, n. 2, 2022. DOI: 10.3390/su14020647.
- NAIK, Sweta; SATYA ESWARI, Jujjavarapu. Electrical waste management: Recent advances challenges and future outlook. **Total Environment Research Themes**, v. 1–2, n. April, p. 100002, 2022. DOI: 10.1016/j.totert.2022.100002. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.totert.2022.100002>.
- ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **ODS - Objetivos de desenvolvimento sustentável - Agenda 2030**. 2015.
- PARAJULY, Keshav; FITZPATRICK, Colin; MULDOON, Orla; KUEHR, Ruediger. Behavioral change for the circular economy: A review with focus on electronic waste management in the EU. **Resources, Conservation and Recycling: X**, v. 6, n. August 2019, p. 100035, 2020. DOI: 10.1016/j.rcrx.2020.100035. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rcrx.2020.100035>.
- PARAJULY, Keshav; KUEHR, Ruediger; AWASTHI, Abhishek Kumar; FITZPATRICK, Colin; LEPAWSKY, Josh; SMITH, Elisabeth; WIDMER, Rolf; ZENG, Xianlai. **Future e-waste scenariosStEP (Bonn), UNU ViE-SCYCLE (Bonn) & UNEP IETC (Osaka)**. 2019.
- PRESIDENCIA DA REPUBLICA DO BRASIL. L13709compilado2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/L13709compilado.htm. Acesso em: 30 jun. 2023.
- SEIF, Rania; SALEM, Fatma Zakaria; ALLAM, Nageh K. **E-waste recycled materials as efficient catalysts for renewable energy technologies and better environmental sustainability**. ed.: Springer Netherlands, 2023. DOI: 10.1007/s10668-023-02925-7. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10668-023-02925-7>.
- SHARMA, Manu; JOSHI, Sudhanshu; KUMAR, Ashwani. Assessing enablers of e-waste management in circular economy using DEMATEL method: An Indian perspective. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 12, p. 13325–13338, 2020. DOI: 10.1007/s11356-020-07765-w.
- SHITTU, Olanrewaju S.; WILLIAMS, Ian D.; SHAW, Peter J. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. **Waste Management**, v. 120, p. 549–563, 2021. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.10.016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.016>.
- SRINIVASAN, L.; AGARWAL, Manan; SARKAR, Shubhdeep; QUADRI, Md Asif Kamal; GULATI, Dhruv. A Survey on Various Approaches to e-waste management. **2022 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2022**, p. 1–6, 2022. DOI: 10.1109/ICCCI54379.2022.9740930.
- SUNDAR, Damini; MATHIYAZHAGAN, Kaliyan; AGARWAL, Vernika; JANARDHANAN, Mukund; APPOLLONI, Andrea. **From linear to a circular economy in the e-waste management sector: Experience from the transition barriers in the United Kingdom**. *Business Strategy and the Environment*, 2023. DOI: 10.1002/bse.3365.
- THUKRAL, Sonal; SHREE, Deep; SINGHAL, Shakshi. Consumer behaviour towards storage, disposal and recycling of e-waste: systematic review and future research prospects. **Benchmarking**, v. 30, n. 3, p. 1021–1072, 2022. DOI: 10.1108/BIJ-12-2021-0774.
- WERNECK DE FARIA BARROS GALVÃO, Thaís; MARTINS DE OLIVEIRA, Edson; WERNECK DE FARIA BARROS GALVÃO, Tatiane; A. B. DE ANDRADE, José; SOARES PENEDO, Lucas; D. DA S. DE SOUZA, Patricia. Cumprimento de políticas públicas ambientais e destinação de resíduos eletrônicos: uma análise dos fatores dificultadores. **Revista Eletrônica TECCEN**, v. 14, n. 1, p. 07–13, 2021. DOI: 10.21727/teccen.v14i1.2553.
- XAVIER, Lúcia Helena; OTTONI, Marianna; LEPAWSKY, Josh. Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126570, 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126570. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126570>.
- YANG, Mingyu; CHEN, Lin; WANG, Jiangjiang; MSIGWA, Goodluck; OSMAN, Ahmed I.; FAWZY, Samer; ROONEY, David W.; YAP, Pow Seng. Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. **Environmental Chemistry Letters**, v. 21, n. 1, p. 55–80, 2023. DOI: 10.1007/s10311-022-01499-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>.
- YIN, Robert K. Case Study Research: Design and Methods: Design and Methods. *In: 2014, Anais [...]*. : SAGE Publications, 2014. p. 313.



DEPÓSITOS ANTROPOGÊNICOS: RECUPERAÇÃO DE RECURSO SECUNDÁRIO A PARTIR DE ÍMÃS DE Neodímio-Ferro-Boro (NdFeB)

Franciele Rossetti Cúnico^{1*}; Jéssica Prats Raspini²; Gisele de Lorena Diniz Chaves³;
Lucila Maria de Souza Campos⁴; Orestes Estevam Alarcon⁵
^{1,2,3,4,5} Universidade Federal de Santa Catarina
*franciele.ros7@mail.com

Resumo

A demanda por ímãs de NdFeB aumentou significativamente devido à transição global para uma infraestrutura de baixo carbono. No momento em que as tecnologias que empregam estes ímãs atingem o fim da sua vida útil, tem-se um grande volume de ímãs pós-consumo. Os ímãs de NdFeB têm elevado teor de elementos de terras raras (ETR), os quais são materiais críticos para a economia global. Deste modo, a recuperação dos ETR de produtos pós-consumo, processo reconhecido como mineração urbana (MU), representa uma fonte alternativa aos depósitos geológicos desses elementos. Ainda, é possível recuperar as terras raras contidas nos resíduos gerados durante o processo de fabricação dos ímãs de NdFeB, ou seja, nos produtos pré-consumo. Estas duas fontes antropogênicas (pré e pós-consumo) de terras raras devem ser geridas de modo a favorecer a economia circular desses recursos. Este artigo, portanto, resume a viabilidade da recuperação de ETR a partir de fontes secundárias. Propõe-se um processo de circuito fechado para auxiliar na adoção da melhor solução tecnológica na cadeia produtiva de ímãs no Brasil.

Palavras-chave: NdFeB; Elemento de Terras Raras; Reciclagem; Recurso Secundário; Mineração Urbana, Economia Circular.

1. Introdução

Considerando o contexto de transição para uma economia energética de baixo carbono, os ímãs de NdFeB são vitais nas tecnologias desenvolvidas para fornecer mobilidade sustentável (motores de carros elétricos e híbridos) e fornecimento de energia limpa (aerogeradores) (FIRDAUS et al., 2016; COEY, 2020). Os ímãs NdFeB possuem propriedades magnéticas superiores aos demais ímãs presentes no mercado atual e são fabricados a partir de uma liga que contém terras raras, principalmente neodímio (Nd) (YANG et al., 2017; SUGIMOTO, 2011). Devido a sua relevância, os elementos de terras raras são conhecidos por “vitaminas industriais” (PATIL et al., 2020).

Ímãs de NdFeB contêm aproximadamente 30-40% de peso de ETR e há tecnologias que empregam grandes quantidades desse ímã, caso dos aerogeradores que podem conter mais de 2000 Kg de NdFeB (LIXANDRU et al., 2017; HABIB, 2019).



Neste contexto, o fornecimento de terras raras pode ser um fator limitante à expansão dos setores de eletromobilidade e energia eólica.

O percentual de ETR nos ímãs os torna valiosos recursos secundários para o mercado (YUE et al., 2019; YANG et al., 2020; ÖNAL et al., 2017; LIXANDRU et al., 2017). Recuperar terras raras dos ímãs pós-consumo é uma estratégia que demanda menor energia e resulta em 98% menos toxicidade à saúde humana, em relação a extração mineral primária (JIN et al., 2018; SPRECHER et al., 2014). A recuperação dos ETR a partir dos ímãs de NdFeB também tornou-se objeto de interesse de pesquisa devido ao seu alto valor econômico (DUSHYANTHA et al., 2020) e à dependência chinesa: a China foi responsável por 92% da produção global anual de ímãs NdFeB em 2020 (SMITH et al., 2022).

Considerando o contexto de recuperação de recurso secundário, a mineração urbana (MU) é tida como uma ferramenta para fomentar a economia circular no setor (EC) a partir da recuperação de recursos em produtos pós-consumo (XAVIER; OTTONI; ABREU, 2023). Ainda, considerando o processo de fabricação dos ímãs de NdFeB (etapa pré-consumo), estima-se que 6 a 73% dos materiais magnéticos são desperdiçados como limalha ou pó (CHOWDHURY et al., 2021). Deste modo, os resíduos da produção também representam uma fonte alternativa de terras raras. Portanto, as duas fontes antropogênicas de terras raras, pré-consumo e pós-consumo de ímãs, devem ser geridas para garantir o fornecimento contínuo de terras raras para a indústria brasileira.

A pesquisa sobre a recuperação de recurso secundário a partir de ímãs de NdFeB concentrou-se em duas direções, a saber (1) revisão sistemática da literatura dos principais métodos de solução tecnológicas para recuperar os ETR de ímãs pós-consumo e pré-consumo, exibindo vantagens, desvantagens e limitações sob as óticas técnica e ambiental, e (2) proposição do processo de circuito fechado para auxiliar na adoção da melhor solução tecnológica na cadeia produtiva de ímãs NdFeB no Brasil, corroborando com o conhecimento científico e uma visão macro da recuperação de recurso secundário.

2. Método

O processo de pesquisa integrou a pesquisa documental exploratória e incluiu a revisão sistemática da literatura (RSL). A revisão sistemática foi aplicada com o intuito de consolidar as soluções tecnológicas atuais de recuperação de material secundário a partir de ímãs de NdFeB. Primeiramente, foi realizada uma análise preliminar das palavras-chave como: “*circular economy*”, “*urban mining*”, “*recover*”, “*reverse supply chain*” e *recycl**. Verificou-se a necessidade de incluir novas palavras-chave: “*end of life*” OR *recycl** OR *recover** AND *waste* OR *scrap** OR *swarf* AND *magnet** AND *permanent* OR *NdFeB* OR *Nd-Fe-B* OR *neodymium*. A Figura 1 exemplifica a metodologia aplicada. Apenas artigos relevantes, de acordo com o *Journal Impact Factor (JIF)*, foram considerados.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

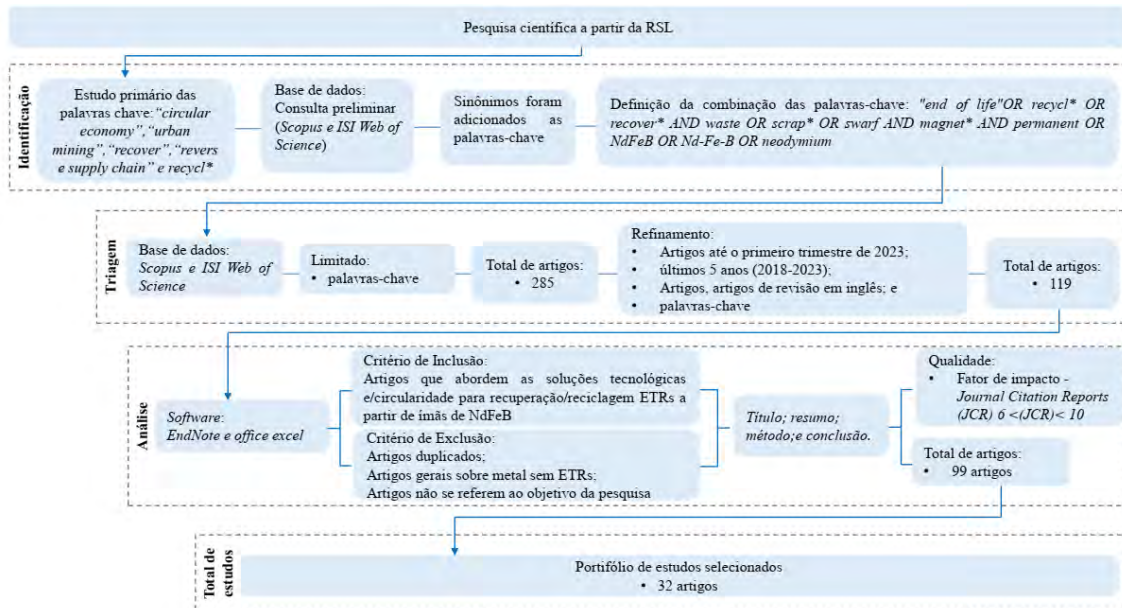


Figura 1 – Metodologia aplicada no estudo de RSL
Fonte: AUTORES, 2023.

Foram selecionadas 32 pesquisas recentes para posterior análise de conteúdo. O desenvolvimento conceitual teve como premissa categorizar estudos de acordo com a temática da mineração urbana. Por fim, um fluxograma esquemático do retorno de recurso secundário pós e pré-consumo é apresentado.

3. Resultados

A análise anual dos artigos selecionados revela que a recuperação de material secundário é um tema emergente. Estudos de 2020 até o terceiro trimestre de 2023 representam, aproximadamente, 68% do portfólio de estudos. No geral, a recuperação de material secundário é advinda de ímãs de NdFeB aplicados em eletroeletrônicos, caso dos discos rígidos (HDD). Após a análise de conteúdo, identificou-se que a mineração urbana foi abordada em sete diferentes tópicos: a) soluções tecnológicas convencionais para recuperar recurso secundário pós e pré-consumo; b) abordagens químicas; c) abordagens elétricas; d) abordagens físicas e térmicas; e) abordagens biológicas; f) resíduos industriais, e g) gestão de recurso secundário pós-consumo.

3.1 Soluções tecnológicas convencionais para recuperar recurso secundário pós e pré-consumo: reutilização e recuperação

O processo de reutilização direta é evidenciado em dois trabalhos (JIN et al., 2020; KUMARI; SAHU, 2023). Esta opção é considerada mais atraente ecológica e economicamente por reutilizar o ímã diretamente, limitada aos casos em que a composição desejada do novo ímã seja igual ao ímã pós-consumo disponível (ZHANG et al., 2018). No entanto, esta opção só é possível em ímãs grandes e de fácil acesso, como os utilizados em turbinas eólicas e veículos híbridos e elétricos - tecnologias que possuem



ciclo de vida longo e, portanto, os estoques de ímãs ficam inacessíveis por um período considerável de tempo (ZANG et al., 2018; KUMARI; SAHU, 2023).

Por sua vez, a recuperação do material secundário é possível por duas alternativas: (1) reciclagem direta do ímã NdFeB, em que um ímã “resíduo maciço” pós-consumo é transformado em outro ímã de NdFeB ou (2) extração das terras raras a partir do ímã de NdFeB pós-consumo ou pré-consumo, pelo qual os ETR são extraídos e podem ser direcionados a outras finalidades.

Para a reciclagem direta do ímã, a abordagem de decriptação de hidrogênio (HD) foi evidenciada em dois artigos (JÖNSSON et al., 2020; SCHÖNFELDT et al., 2023). O processo HD permite converter o ímã pós-consumo em grânulos ou pó. Este processo consiste em dois estágios: no primeiro o hidrogênio é absorvido pela fase de contorno do grão rico em Nd e no segundo pela fase matriz de Nd₂Fe₁₄B. Segundo Schönfeldt et al. (2023), esta técnica é vantajosa porque o processo HD não danifica a microestrutura texturizada inerente ao ímã. No entanto, essa solução tecnológica tem limitações quanto ao uso de ímãs oxidados e material triturado com alta contaminação (JÖNSSON et al., 2020; SCHÖNFELDT et al., 2023). Ikram et al. (2019) apresentam outra solução tecnológica como a mais adequada para revitalizar os ímãs pós-consumo de NdFeB. Os autores consideraram a reciclagem direta de ímãs em quatro etapas: hidrogenação-desproporção-dessorção-recombinação (HDDR). Na hidrogenação os ímãs de NdFeB são expostos ao hidrogênio, que se difunde na liga e provoca a formação de fases hidretadas.

Na desproporção os ímãs são aquecidos a uma temperatura em torno de 800°C, que faz com que as fases hidretadas se decomponham em fases elementares (Nd, Fe e B) e em fases intermetálicas (NdH₂ e Nd₂Fe₁₄B). Na dessorção, os ímãs desproporcionados são aquecidos a 1000°C, que faz com que o hidrogênio seja liberado da liga e saia do sistema. Por fim, na recombinação, os ímãs dessorvidos são resfriados a uma taxa controlada, que faz com que as fases elementares e intermetálicas se recobinem em nova fase de Nd₂Fe₁₄B, como uma estrutura cristalina diferente da original. A vantagem é obter pós anisotrópicos, com excelentes propriedades magnéticas, que podem ser usados para fabricar novos ímãs sinterizados (IKRAM et al., 2019).

Gandha et al. (2019) apresentam a remanufatura aditiva como alternativa sustentável e econômica para aproveitar os ímãs NdFeB sinterizados que seriam descartados ou substituídos. Após passar pela etapa de HDDR, o pó magnético é misturado com um ligante polimérico para formar um compósito homogêneo. A proporção entre o pó e o ligante pode variar de acordo com o desempenho desejado. Conforme os autores, o compósito é usado como material de impressão em uma impressora 3D que deposita camadas sucessivas do compósito sobre uma base, seguindo um modelo digital. Deste modo, é possível obter ímãs compósitos com diferentes formas e tamanhos. Além disso, a impressão 3D permite uma maior liberdade de design e personalização dos ímãs compósitos.

Para o processo de extração das terras raras a partir de ímãs de NdFeB, quatro artigos discutiram a recuperação de terras raras sob a ótica das soluções tecnológicas convencionais, como os processos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos, e a combinação das técnicas (OMODARA et al., 2019; KARAL et al., 2021; BIAN et al., 2022; KUMARI; SAHU, 2023).



A solução tecnológica hidrometalúrgica para recuperar o elemento Nd foi abordada por Karal et al. (2021), indicando que o método consiste em pré-tratamento, lixiviação química (abordada no item 3.1.1 e 3.1.2) e precipitação de metal Nd. Verificou-se que, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, a produção de ímãs a partir de Nd recuperado teve um desempenho das propriedades magnéticas melhor do que a produção de ímãs virgens. Os impactos ambientais do sistema de produção de ímãs NdFeB reduziram em até 65% para oito das onze categorias de impacto ambiental. Ainda, no que tange a economia, a reciclagem de Nd reduziu o custo de produção de 8,55 para 3,98 USD/kg (KARAL et al., 2021). Em geral, a hidrometalurgia é considerada um método preciso, altamente flexível e de fácil controle ao extrair o metal, bem como possibilita a alta pureza do produto, mesmo com provável presença de contaminantes. Como desvantagem, cita-se a geração de grandes quantidades de águas residuais (OMODARA et al., 2019; KARAL et al., 2021).

As soluções pirometalúrgicas concentram o metal de interesse através de reações envolvendo elevadas temperaturas. A capacidade de operação em grande escala é uma das vantagens desse processo, assim como, não há necessidade de um pré-tratamento dos resíduos, como ocorre em outros processos metalúrgicos (BIAN et al., 2022). Geralmente, o processo pirometalúrgico é aplicável a todos os tipos de composições magnéticas, sem geração de águas residuais e menos etapas de processamento do que métodos hidrometalúrgicos. A fusão direta permite a obtenção de ligas principais e a extração de metal líquido permite a obtenção de ETR em estado metálico (KUMARI; SAHU, 2023; BIAN et al., 2022; OMODARA et al., 2019). Como desvantagens desse processo, tem-se a necessidade de maior entrada de energia e a fundição direta e extração de metal líquido não é aplicada aos ímãs oxidados (OMODARA et al., 2019).

Conforme Zhang et al. (2018), a tecnologia inovadora “aeriometalurgia”, conhecida como extração de fluido supercrítico, é uma alternativa viável ao processo de pirometalurgia e hidrometalurgia para recuperar Nd, Pr e Dy, de ímãs Nd-Fe-B pós-consumo. Os autores indicaram que o processamento de 30kg de ímãs por hora atingiu uma pureza de 99% em peso e menos de 0,1% em peso de contaminação de metal. O processo utiliza CO₂ supercrítico como solvente, o qual é seguro, inerte e abundante, junto com o agente quelante tributil-fosfato-ácido nítrico (TBP-HNO₃) e 2% em peso de metanol como co-solvente.

3.1.1 Abordagens químicas

Um total de três artigos apresentaram a extração por solvente como solução tecnológica (PAVÓN et al., 2018; YADAV et al., 2018; JEON et al., 2021). Esta técnica é eficaz na remoção de íons metálicos na água e produz soluções e compostos únicos de terras raras de alta pureza, podendo ser usado comercialmente (PAVÓN et al., 2018). Uma das desvantagens é a necessidade de uso de solvente e a restrição de aplicabilidade às soluções de íons metálicos não diluídos, o que prolonga o processo (YADAV et al., 2018). A recuperação de ETR a partir de solução de lixiviação foi possível no estudo de Sui et al. (2022). Já uma descoberta recente por Jeon et al. (2021) sugeriram que o Cyanex 272 é o melhor reagente para recuperação e potencial separação entre ETR.



3.1.2 Abordagens elétricas

Abordagens elétricas para separação de ETR são apresentadas em quatro pesquisas (YANG et al., 2020; MAKAROVA et al., 2020; HAMMACHE et al., 2021; HUA et al., 2022). A extração de ETR em solução ou célula eletroquímica, usando eletrolução (fonte que emite baixa frequência de campo magnético, exemplo, celulares, computadores, etc.) e hidrometalurgia integradas, tem a vantagem de baixo uso de reagentes químicos e menos consumo de energia quando comparado à pirometalurgia. A limitação desta técnica é a eficiência que diminui ao longo do tempo, sendo necessário a solução de lixiviação (YANG et al., 2020; MAKAROVA et al., 2020; HUA et al., 2022).

Outra separação possível de ETR é pela abordagem de eletrodialise. Segundo Hammache et al. (2021), na eletrodialise a separação ocorre pelo fluxo de íons em uma membrana semipermeável com auxílio de um potencial elétrico. A vantagem é a eliminação de impurezas através de uma membrana de troca iônica, porém, a operação é de alto custo.

Em resumo, a abordagem química pode ser utilizada como uma etapa no processo hidrometalúrgico e também pode ser utilizada para isolar ou concentrar ETR do lixiviado, bem como métodos de eletrodialise (KARAL et al., 2021; HAMMACHE et al., 2021). Durante a lixiviação, os ímãs são dissolvidos em uma solução ácida e o ETR é liberado na forma de íons (PAVÓN et al., 2018; YADAV et al., 2018). Segundo Jeon et al. (2021), as possibilidades de separação foram muito altas entre Dy e Tb. Uma variedade de sistemas aquosos podem ser usados para lixiviação, incluindo ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico, ácido cítrico e ácido acético (PAVÓN et al., 2018; YADAV et al., 2018). Apesar do menor impacto ambiental comparado à pirólise, o uso e descarte de agentes lixiviantes pode resultar em um elevado volume de efluentes residuais, ácidos e alcalinos.

3.4 Abordagens físicas e térmicas

Uma abordagem alternativa para recuperar recurso secundário a partir de resíduos de NdFeB altamente oxidados ou contaminados é proposta por Zhou et al. (2019). Neste estudo, o método de autocombustão assistida por micro-ondas seguido por um processo de redução e difusão é utilizado. As melhores propriedades magnéticas do produto final são obtidas quando a proporção de CaH_2 para óxidos é de 1:1:1, embora seja necessária uma otimização adicional. A vantagem desse processo são as características dielétricas que reduzem o tempo de aquecimento. No entanto, a autocombustão limita-se a grandes tamanhos de partícula insolúveis após torrefação de micro-ondas (XU et al., 2022).

3.5 Abordagens biológicas

Um total de dois artigos apresentaram abordagens biológicas para separação de ETR (BREWER et al., 2019; WAMEA et al., 2022). As técnicas biológicas extraem metais valiosos de minérios de baixo teor, usando micro-organismos (bactérias). Os custos operacionais dessa rota são baixos em comparação com métodos convencionais de mineração. Como limitação, destacam-se: são restritas a ambientes de pH elevado, dificuldade na reprodução de micro-organismos; toxicidade bacteriana e baixas taxas de reação. Wamea et al. (2022) exploraram a remoção de íons neodímio de meios aquosos



usando nanocelulose aniônica pilosa - um material sustentável promissor para a remoção de Nd 3+ de soluções, o que pode permitir a reciclagem de neodímio de fontes secundárias, como resíduos eletrônicos e ímãs permanentes de NdFeB.

3.6 Resíduos industriais

Um total de três trabalhos (CALDERON et al., 2020; NKINAHAMIRA et al., 2020; CHOWDHURY et al. 2021) discutiram a obtenção de ETR a partir de resíduos industriais. Calderon et al. (2020) investigaram o potencial de recuperação a partir do rejeito da mina primária. O resultado obtido foi uma pirrotita níquelífera magnética para recuperação de metais preciosos. O estudo de Nkinahamira et al. (2020) utilizou um procedimento simples de lavagem com soluções ácidas diluídas para recuperar ETR de águas residuais industriais. Já Chowdhury et al. (2021) utilizaram nitrato de cobre (II) para dissolver limalhas magnéticas de NdFeB, em alternativa ao uso de ácidos fortes. A reciclagem do nitrato de cobre foi incorporada ao sistema produtivo dos ímãs para reduzir o consumo de matéria-prima e a geração de resíduos. Isso resultou em melhorias significativas no resultado econômico e ambiental geral.

4 Gestão de recurso secundário pós-consumo.

Soluções estudadas por Nguyen et al. (2020) e Li et al. (2021) abordaram a remanufatura como processo industrial, a qual consiste em desmontar o produto usado, limpar suas peças e reparar ou substituir as peças danificadas para montar novamente o produto, o que diferencia da reciclagem e da reutilização. Além das soluções tecnológicas para recuperar recurso secundário supradescritas, foram identificados estudos orientados para a gestão do recurso secundário, como as pesquisas que apresentam estimativas de volume com análise de fluxo de material (AFM) e da demanda futura por ímãs de NdFeB, evidenciando a quantidade futura nos depósitos antropogênicos (CIACCI et al., 2019; YAO et al., 2021; VAN NIELEN et al., 2023; PEETERS et al., 2018; Li et al., 2022). A análise de sensibilidade de Peeters et al. (2018), indica que a lucratividade da recuperação de ímãs de disco rígido, por exemplo, depende fortemente do custo de mão-de-obra, capacidade anual e valor do material.

Por fim, com base na presente pesquisa e com o intuito de integrar as soluções tecnológicas para recuperação de recurso secundário e considerando o retorno dos resíduos dos tipos pré e pós-consumo, propõem-se um modelo esquemático (Figura 2). Compilou-se o processo produtivo do ímã ao circuito fechado para a circularidade dos recursos secundários, de acordo com as categorias de estudo identificadas no portfólio.

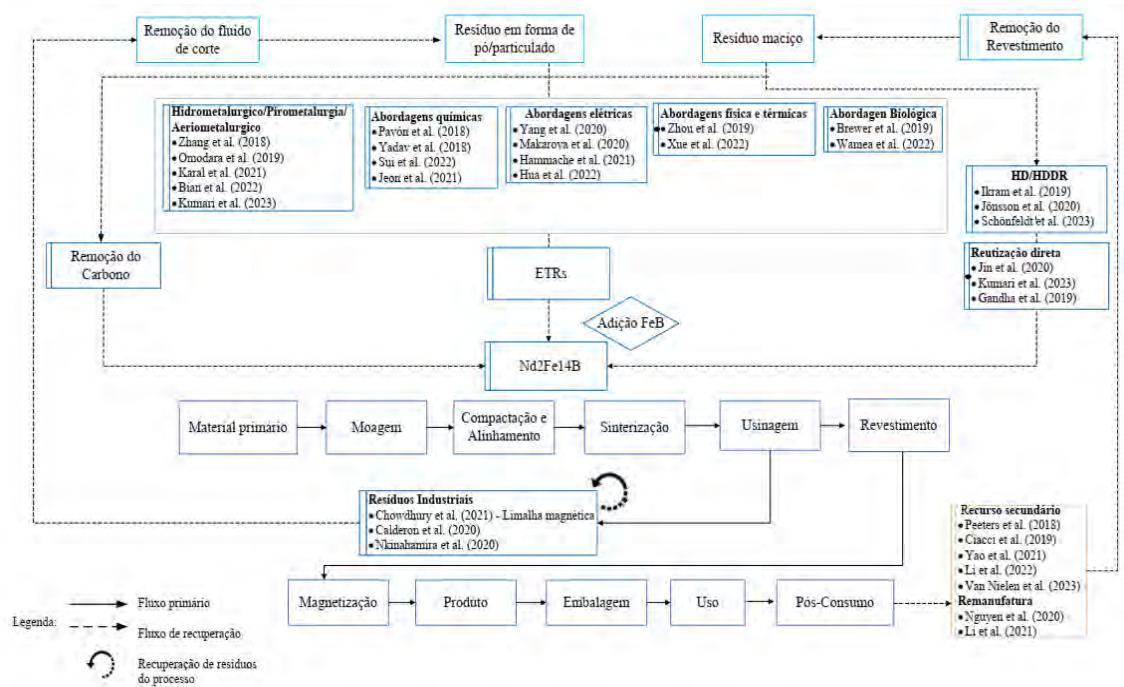


Figura 2 – Fluxograma esquemático de recuperação de recurso secundário
Fonte: AUTORES, 2023.

5. Discussão e considerações finais

A eficiência do método de recuperação depende das características do recurso secundário, seja um ímã NdFeB pós-consumo ou resíduo industrial. A escolha da solução tecnológica depende de fatores como a disponibilidade de matéria-prima, custo energético, rendimento, qualidade do produto final (grau de contaminação) e impacto ambiental (ZHANG et al., 2018). Diversas soluções tecnológicas têm sido desenvolvidas, como reúso direto, hidrometalurgia, pirometalurgia, eletroquímica e abordagens biológicas, etc. Contudo, apenas algumas são consideradas robustas, ecologicamente corretas e eficientes para serem aplicadas em escala industrial (KARAL et al., 2021).

Portanto, há ampla oportunidade para desenvolver processos eficientes para a extração seletiva e separação de metais de terras raras a partir de ímãs NdFeB pós-consumo. De acordo com o portfólio e com a Figura 2, os processos tecnológicos convencionais de recuperação de terras raras são os mais estudados (16% dos artigos), seguido pelas abordagens químicas (13%). A discussão de abordagens biológicas ocorreu em apenas dois estudos, o que demonstra que essa potencial tecnologia demanda pesquisas mais aprofundadas. Salienta-se ainda, que a maior parte dos estudos foi direcionada à recuperação de ETR a partir de produtos pós-consumo e/ou outros resíduos industriais, enquanto somente três pesquisas abordaram a recuperação de ETR a partir dos resíduos gerados no processo de fabricação dos ímãs. Para fechar o ciclo dos recursos, é fundamental considerar este tipo de resíduo como fonte alternativa de terras raras e, portanto, mais pesquisas são necessárias.

Estudos como o de Chowdhury et al. (2021) podem ser benéficos para os fabricantes de ímãs de NdFeB, que podem aumentar sua receita estabelecendo uma



instalação de reciclagem de limalhas co-localizada com a fábrica de ímãs. Este trabalho pode ser estendido para a abordagens de separação de óxidos de terras raras agregados em óxidos individuais.

Para auxiliar na gestão dos recursos secundários, estudos para quantificar a disponibilidade de recurso secundário futuro vêm sendo desenvolvidos, como a análise de fluxo de material (AFM) (CIACCI et al., 2019; YAO et al., 2021; WAN NIELEN et al., 2023). Estima-se que cerca de 300.000 toneladas de terras raras sejam armazenadas em todo o mundo na forma de ímã, o que demonstra um grande potencial para a mineração urbana dos elementos de terras raras, estimulando empresas de gerenciamento de resíduos (KUMARI; SAHU, 2023). O uso de recurso secundário tem vantagens significativas, como elevada economia de energia e redução de emissões de gás efeito estufa (GEE) (CIACCI et al., 2019). Atualmente, o design do produto, a coleta no final da vida útil e as questões de preço do recurso secundário são os principais obstáculos à recuperação dos ETR (CIACCI et al., 2019; CALDERON et al., 2020).

Contudo, para que o sistema circular apresentado na Figura 2 seja consolidado, garantir a gestão pós-consumo dos produtos que empregam ímãs NdFeB é fundamental. Para isso, é necessário envolver todos os *stakeholders* da cadeia de suprimentos de terras raras no Brasil. Pesquisas que consideram a etapa de coleta e transporte dos ímãs pós-consumo, considerando as singularidades do território nacional, devem ser exploradas. As recicladoras, que atualmente fazem a gestão dos eletroeletrônicos descartados, devem ser incluídas como fluxo formal de fornecimento de ímãs pós-consumo. Ainda, salienta-se que todas as fontes alternativas de terras raras, pré e pós-consumo e resíduos industriais, devem ser exploradas para diminuir a mineração primária desses elementos.

Agradecimentos

As autoras agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

- BIAN, Y. Y. et al. **Recovery of rare earth elements from permanent magnet scraps by pyrometallurgical process.** *Rare Metals*, v. 41, n. 5, p. 1697-1702, 2022.
- BREWER, A. et al. **Microbe Encapsulation for Selective Rare-Earth Recovery from Electronic Waste Leachates.** *Environmental Science and Technology*, v. 53, n. 23, p. 13888-13897, 2019.
- CALDERON, A. R. M. et al. **Repurposing of nickeliferous pyrrhotite from mine tailings as magnetic adsorbent for the recovery of gold from chloride solution.** *Resources, Conservation and Recycling*, v. 161, 2020.
- CHOWDHURY, N. A. et al. **Sustainable Recycling of Rare-Earth Elements from NdFeB Magnet Swarf: Techno-Economic and Environmental Perspectives.** *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, n. 47, p. 15915-15924, Nov2021.



- CIACCI, L. et al. Recovering the “new twin”: **Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 142, p. 143-152, 2019.
- COEY, J. M. D. **Perspective and Prospects for Rare Earth Permanent Magnets**. *Engineering*, v. 6, n. 2, p. 119–131, 2020.
- DUSHYANTHA, N. et al. **The story of rare earth elements (REEs): Occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production**. *Ore geology Reviews*, v. 122, 2020.
- FIRDAUS, M. et al. **Review of High-Temperature Recovery of Rare Earth (Nd/Dy) from Magnet Waste**. *Journal of Sustainable Metallurgy*, v. 2, n. 4, p. 276–295, 2016.
- GANDHA, K. et al. **Recycling of additively printed rare-earth bonded magnets**. *Waste Management*, v. 90, p. 94-99, 2019.
- HABIB, K. **A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets**. *Journal of Cleaner Production*, v. 230, p. 90–97, 2019.
- HAMMACHE, Z. et al. Recovery of rare earth elements from electronic waste by diffusion dialysis. *Separation and Purification Technology*, v. 254, 2021.
- HUA, H.; YASUDA, K.; NOHIRA, T. **Highly Efficient and Precise Electrolysis Separation of Dysprosium from Neodymium for Magnet Scrap Recycling in Molten Salt**. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, v. 10, n. 28, p. 9225-9231, 2022.
- IKRAM, A. et al. **The sintering mechanism of fully dense and highly coercive Nd-Fe-B magnets from the recycled HDDR powders reprocessed by spark plasma sintering**. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 774, p. 1195-1206, 2019.
- JEON, J. H. et al. **Environmentally sound technology development for processing of rare earth elements from waste permanent magnets synthetic leach solutions: recovery and separation perspectives**. *Separation and Purification Technology*, v. 275, 2021.
- JIN, H. et al. **Life cycle assessment of emerging technologies on value recovery from hard disk drives**. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 157, 2020.
- JIN, H.; AFIUNY, P.; DOVE, S.; FURLAN, G.; ZAKOTNIK, M.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J. W. **Life Cycle Assessment of Neodymium-Iron-Boron Magnet-to-Magnet Recycling for Electric Vehicle Motors**. *Environmental Science & Technology*, v. 52, n. 6, p. 3796-3802, 2018.
- JÖNSSON, C. et al. **The extraction of NdFeB magnets from automotive scrap rotors using hydrogen**. *Journal of Cleaner Production*, v. 277, 2020.
- KARAL, E. et al. **Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective**. *Journal of Cleaner Production*, v. 288, 2021.



- KUMARI, A.; SAHU, S. K. **A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet.** Separation and Purification Technology, v. 317, 2023.
- LI, Q. Y. et al. **Reforming Magnet Waste to Prussian Blue for Sustainable Sodium-Ion Batteries.** ACS Applied Materials and Interfaces, v. 14, n. 42, p. 47747-47757, 2022.
- LI, Z. et al. **Implementation and analysis of remanufacturing large-scale asynchronous motor to permanent magnet motor under circular economy conditions.** Journal of Cleaner Production, v. 294, 2021.
- LIXANDRU, A.; VENKATESAN, P.; JÖNSSON, C.; et al. **Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment.** Waste Management, v. 68, p. 482–489, 2017.
- MAKAROVA, I. et al. **One-step recovery of REE oxalates in electro-leaching of spent NdFeB magnets.** Separation and Purification Technology, v. 251, 2020.
- NGUYEN, R. T. et al. **Critical material content in modern conventional U.S. vehicle electronics.** Waste Management, v. 109, p. 10-18, 2020.
- NKINAHAMIRA, F. et al. **Selective and fast recovery of rare earth elements from industrial wastewater by porous β -cyclodextrin and magnetic β -cyclodextrin polymers.** Water Research, v. 181, 2020.
- OMODARA, L. et al. **Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review.** Journal of Cleaner Production, v. 236, 2019.
- ÖNAL, M. A. R.; BORRA, C. R.; GUO, M.; BLANPAIN, B.; VAN GERVEN, T. **Hydrometallurgical recycling of NdFeB magnets: Complete leaching, iron removal and electrolysis.** Journal of Rare Earths, v. 35, n. 6, p.574–584, 2017
- PATIL, A. B.; TARIK, M.; STRUIS, R. P. W. J.; LUDWIG, C. **Exploiting end-of-life lamps fluorescent powder e-waste as a secondary resource for critical rare earth metals.** Resources, Conservation and Recycling, v. 164, 2021.
- PAVÓN, S.; FORTUNY, A.; COLL, M. T.; SASTRE, A. M. **Neodymium recovery from NdFeB magnet wastes using Primene 81R·Cyanex 572 IL by solvent extraction.** Journal of Environmental Management, v. 222, p. 359-367, 2018.
- PEETERS, J. R. et al. **Forecasting the recycling potential based on waste analysis: A case study for recycling Nd-Fe-B magnets from hard disk drives.** Journal of Cleaner Production, v. 175, p. 96-108, 2018.
- SCHÖNFELDT, M. et al. **Magnetic and structural properties of multiple recycled and sustainable sintered Nd-Fe-B magnets.** Journal of Alloys and Compounds, v. 939, 2023.
- SMITH, B. J. et al. **Rare earth permanent magnets - Supply chain deep dive assessment.** U.S. Department of Energy Response to Executive Order 14017, “America’s supply chains”, n. PART 1, p. 82, 2022.



- SPRECHER, B.; KLEIJN, R.; KRAMER, G. J. **Recycling potential of neodymium: The case of computer hard disk drives.** Environmental Science and Technology, v. 48, n. 16, p. 9506–9513, 2014.
- SUGIMOTO, S. **Current status and recent topics of rare-earth permanent magnets.** Journal of Physics D: Applied Physics. Nº44, 11 p., 2011.
- SUI, N.; CUI, K.; HUANG, K. **A new strategy of thin oil film extraction for enhanced recovery and separation of praseodymium and neodymium.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 3, 2022.
- VAN NIELEN, S. S.; SPRECHER, B.; VERHAGEN, T. J.; KLEIJN, R. **Towards neodymium recycling: Analysis of the availability and recyclability of European waste flows.** Journal of Cleaner Production, v. 394, 2023.
- WAMEA, P.; PITCHER, M. L.; MUTHAMI, J.; SHEIKHI, A. **Nanoengineering cellulose for the selective removal of neodymium: Towards sustainable rare earth element recovery.** Chemical Engineering Journal, v. 428, 2022.
- XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; ABREU, L. P. P. **A comprehensive review of urban mining and the value recovery from e-waste materials.** Resources, Conservation and Recycling, v. 190, 2023.
- XUE, W. et al. **Selective extraction of Nd(III) by novel carboxylic acid based ionic liquids without diluent from waste NdFeB magnets.** Journal of Molecular Liquids, v. 364, 2022.
- YADAV, K. K.; ANITHA, M.; SINGH, D. K.; KAIN, V. **NdFeB magnet recycling: Dysprosium recovery by non-dispersive solvent extraction employing hollow fibre membrane contactor.** Separation and Purification Technology, v. 194, p. 265-271, 2018.
- YANG, Y. et al. **Recovery of rare-earth element from rare-earth permanent magnet waste by electro-refining in molten fluorides.** Separation and Purification Technology, v. 233, 2020.
- YANG, Y.; LAN, C.; WANG, Y.; ZHAO, Z.; LI, B. **Recycling of ultrafine NdFeB waste by the selective precipitation of rare earth and the electrodeposition of iron in hydrofluoric acid.** Separation and Purification Technology, v. 230, 2020.
- YANG, Y.; WALTON, A.; SHERIDAN, R.; et al. **REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review.** Journal of Sustainable Metallurgy, v. 3, n. 1, p. 122–149, 2017.
- YAO, T. et al. **Dynamic neodymium stocks and flows analysis in China.** Resources, Conservation and Recycling, v. 174, 2021.
- YUE, M.; YIN, X.; LIU, W.; LU, Q. **Progress in recycling of Nd-Fe-B sintered magnet wastes.** Chinese Physics B, v. 28, n. 7, 2019.
- ZHOU, X. et al. **Synthesis of hard magnetic NdFeB composite particles by recycling the waste using microwave assisted auto-combustion and reduction method.** Waste Management, v. 87, p. 645-651, 2019.



DESMONTAGEM E PROCESSAMENTO MECÂNICO DE BATERIAS AUTOMOTIVAS DE LÍTIO FERRO FOSFATO (LFP) PÓS USO PARA OBTENÇÃO DE FRAÇÕES CONCENTRADAS EM LÍTIO

Sánchez F.A.L.^{1*}, Lacava P.¹; Endres S.M.E.¹; Trojaner M.R.¹; Veit H.M.¹

¹ LACOR - Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais,

Departamento de Engenharia de Materiais

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

*felipe.sanchez@ufrgs.br

Resumo

A eletrificação veicular em larga escala já é uma realidade a nível global e dá seus primeiros passos rumo à substituição da matriz energética que ainda é essencialmente baseada em combustíveis fósseis. Em um futuro próximo a geração de resíduos eletroeletrônicos de veículos elétricos terá um impacto significativo e as baterias baseadas em lítio, que são peças fundamentais no armazenamento energético desses sistemas veiculares, passarão a compor uma parcela significativa dos resíduos eletroeletrônicos nos centros urbanos. Com isso, as baterias de lítio passam a ser atraentes fontes de materiais estratégicos como o lítio no âmbito da mineração urbana e da economia circular. Diante desse cenário, este trabalho avalia a desmontagem das baterias com posterior processamento mecânico a fim de obter frações concentradas em lítio. Os resultados mostram que a metodologia proposta consegue concentrar até 96% do lítio presente no cátodo de células de lítio ferro fosfato pós uso, nas frações granulométricas com tamanho inferior a 0,5 mm na forma de um pó homogêneo contendo essencialmente compostos de lítio, o que facilitará a posterior recuperação das matérias-primas de lítio de interesse comercial.

Palavras-chave: Mineração urbana, Baterias de lítio, concentração de lítio.

1. Introdução

O aumento da frota de veículos elétricos, fez com que a demanda mundial por baterias automotivas passasse por um crescimento significativo. Devido à crise global de energia e à demanda para reduzir os gases de efeito estufa, o desenvolvimento de veículos elétricos ganhou muita visibilidade na última década (CHEN, K. et al., 2017).

No Brasil, segundo a Federação Nacional da Distribuição de Veículos Automotores (Fenabrave), o mercado de veículos elétricos e híbridos está em plena ascensão, dados publicados expõem que foram emplacados 49.245 híbridos, híbridos plug-in e elétricos, no ano de 2022. Isso representa um aumento de quase 41% em relação ao ano anterior quando 34.990 carros foram emplacados (MADEIRA, 2023). A projeção da Agência Internacional de Energia, publicada no relatório Global EV



Outlook 2021, com base em políticas existentes atualmente, indicou que a frota global de veículos elétricos alcançará a marca de 145 milhões até 2030 (CUSTÓDIO, 2021), (IEA, 2021).

A bateria recarregável é uma parte crítica do sistema de armazenamento de energia eletroquímica usado nos veículos elétricos, sendo as baterias baseadas em lítio (LIBs) os tipos mais comuns devido à sua eficiência energética e capacidade de processamento. Este tipo de bateria, têm variações de vida útil de 5 a 16 anos e 1.000 a 20 mil ciclos de acordo com sua configuração, tamanho e composição (TORRESI, R., 2017).

Existem diferentes tipos de LIBs, dentre eles, as baterias de lítio ferro fosfato em que o principal componente catódico é o LiFePO_4 (LFP), que ganham destaque, especialmente por não conterem cobalto em sua composição. O cobalto é um elemento estratégico que tem enfrentado restrições de produção em alguns países, devido às preocupações com as condições de trabalho nas minas e regras de gestão duvidosas (MINING.COM, 2023). Em um estudo de 2016, realizado pela Anistia Internacional (AI), para o relatório *This Is What We Die For*, em tradução livre “É por isso que nós morreremos”, denunciou que adultos e crianças a partir dos 7 anos de idade, trabalhavam em condições terríveis em áreas de mineração artesanal na República Democrática do Congo, na África, de onde é extraída mais da metade do cobalto do mundo (FERREIRA, 2023). Além disso, o cobalto é um dos componentes mais custosos das baterias de íon-lítio, o que pode aumentar o preço final dos veículos elétricos (BARAN, J., 2018). Desta forma, o uso de baterias do tipo LFP acabam sendo uma alternativa amplamente usadas e atraente para fabricantes e consumidores. No entanto, com a alta demanda e a produção de LIBs, é notável que haja um esforço da comunidade científica e das indústrias pelo desenvolvimento de processos que viabilizem a recuperação e reciclagem das baterias de lítio como um todo. Este tipo de baterias (pós uso) são classificadas como materiais perigosos devido à presença de metais tóxicos, e, caso sejam descartadas diretamente no meio ambiente, existe a possibilidade de vazamento de eletrólitos orgânicos, bem como de metais tóxicos, levando a graves contaminações do solo (GU, F. et al., 2017). A reciclagem de LIBs deverá ser bem explorada, pois constituir-se-á um grande fluxo de resíduos, e sua quantidade deve crescer nos próximos anos.

Um dos insumos para a fabricação das LIBs é o lítio (Li), um metal alcalino, o mais leve da tabela periódica, que não existe na natureza na forma livre, sua abundância na crosta terrestre é significativamente baixa, cerca de 12 ppb (parte por bilhão) e a Austrália, Chile e Argentina possuem as principais reservas deste metal compondo diferentes tipos de minerais. A mineração de lítio pode ocorrer a partir de diferentes fontes, dentre elas a partir de minerais, como o espodumênio, a lepidolita, a petalita, a amblygonita e a montebrasita (GUIMARÃES, B. C. B., 2023). A principal forma de obtenção de lítio no Brasil, em escala industrial, é a mineração na forma de espodumênio ($\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$), um composto inorgânico que apresenta um percentual relativamente baixo de lítio (1,5 a 7% de Li_2O). No Brasil, as reservas de lítio são estimadas em aproximadamente 400.000 toneladas (MINERAL COMMODITY SUMMARIES, 2019).



O lítio, assim como o cobalto, estão listados como metais críticos e estratégicos por diversos países, incluindo o Brasil (Resolução N° 2, de 18 de junho de 2021) e União Europeia (European Commission, Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 – Final Report).

O lítio, a ser utilizado na fabricação de LIBs também pode ser obtido, através da reciclagem de *LIBs* gastas, uma vez que estas possuem em torno de 5 a 6% de lítio (ZHENG, H. et al., 2021). Os processos mecânicos têm se destacado no âmbito da reciclagem das *LIBs*, pois são capazes de realizar a separação dos diversos componentes da bateria, permitindo a concentração de materiais valiosos, como o lítio.

A moagem compreende uma gama de processos que visam reduzir o tamanho dos materiais, através da ação de forças mecânicas. Essa técnica é eficiente na obtenção de frações pulverizadas e concentradas de lítio, uma vez que promove a liberação dos componentes a partir da matriz das células que compõe a bateria. Além disso, a moagem pode ser realizada em diferentes etapas, permitindo a separação de outras frações de interesse, como o alumínio e o cobre, aço, polímeros, etc. (BENVINDO, et al., 2010). A combinação de processos de moagem com separação granulométrica é de suma importância para segregação de diferentes conjuntos de materiais de mesma composição ou afinidade química em distintas frações granulométricas.

Sabe-se que é tecnicamente possível fazer a reciclagem das LIBs, mas ainda não há recuperação em larga escala e com processos consolidados, muito atrelado ao recente consumo desse tipo de baterias e relativa baixa quantidade de resíduos gerados. Contudo, em um futuro muito próximo haverá uma demanda significativa por lítio, uma matéria-prima fundamental para a produção de LIBs e conseqüentemente indispensável atualmente, para a eletrificação massiva da frota automotiva a nível global. Com a crescente demanda por veículos elétricos, é evidente que nos centros urbanos serão geradas grandes quantidades de resíduos eletroeletrônicos de LIBs. Logo, pensar em estratégias de mineração urbana de lítio, é sem dúvida, uma estratégia que permitirá o crescimento de uma cadeia econômica muito importante, não somente em termos financeiros, mas principalmente em termos sociais e ambientais, uma vez que ter-se-á, muito próximo aos centros produtores e consumidores de LIBs, abundante quantidade de resíduos eletroeletrônicos ricos em compostos de lítio para serem recuperados ao invés de minerar e explorar novos recursos naturais para este fim.

Diante deste contexto, este trabalho busca avaliar a desmontagem e caracterização de LIBs pós uso e desenvolver um método eficiente para obter frações concentradas em lítio para sua posterior recuperação a partir do desenvolvimento de processos hidro, piro ou eletrometalúrgicos.

2. Materiais e métodos

Para o desenvolvimento deste trabalho exploratório foram usadas baterias inservíveis contendo células cilíndricas, de tamanho/modelo 32650, com capacidade de

5500 mAh, tensão nominal de 3,2 V e de composição tipo lítio ferro fosfato (LFP) cedidas pela empresa Global localizada em Porto Alegre - RS.

2.1 - Desmontagem

Antes de serem usadas no processo de beneficiamento e concentração dos compostos a base de lítio, as células foram desmontadas dos conjuntos que compreendem um “pack” de uma bateria e foram completamente descarregadas empilhando um grupo de 13 células interligadas em série em conjunto com um resistor em fio como carga por 24h. Após serem descarregadas as baterias foram abertas com uso de disco de corte para metal acoplada a uma microrretífica com o objetivo de remover a carcaça metálica sem destruir os componentes internos, todo esse processo ocorreu dentro de uma capela para evitar a inalação de compostos voláteis presentes no eletrólito. A Figura 1 mostra a sequência de etapas para abertura das células descarregadas.



Figura 1 - Processo de abertura manual das células de LFP. Em (a) a retirada do invólucro polimérico e em (b) o corte transversal da carcaça de aço para expor os componentes internos das células de LFP.

Fonte: AUTOR, 2023.

2.2 – Cominuição e Separação Granulométrica

Para este trabalho foram descarregadas 13 células de LFP, e a partir da abertura e separação manual dos componentes das células de LFP foi separado o material do cátodo, que de fato é o componente rico em lítio e de onde se podem recuperar quantidades representativas deste elemento. As fitas ou bobinas de cátodo foram levadas para processamento mecânico em moinho de facas, visando uma cominuição e posterior separação granulométrica efetiva do substrato de alumínio do lítio ferro fosfato propriamente dito. A Figura 2 apresenta as fitas ou bobinas do cátodo que foram separadas para posterior cominuição e beneficiamento granulométrico.

Foi usado o moinho de facas da marca Retsch modelo SM 300 operando a 1500 rpm com peneiras de abertura de 1,00 mm na primeira moagem e com a peneira de 0,75 mm na segunda passagem do material no processo de moagem.



O material moído foi levado para o processo de separação granulométrica em um conjunto ou sequência de peneiras com as aberturas de 1,00 mm (#16 mesh), 0,5 mm (#32 mesh), 0,25 mm (#60 mesh) e 0,053 mm (#mesh 270) em mesa vibratória com frequência de oscilação constante durante 30 min.



Figura 2 - Fitas de cátodo separadas para beneficiamento por moagem de facas.
Fonte: AUTOR, 2023.

2.3 Caracterização

O material separado nas diferentes frações granulométricas foi analisado por fluorescência de raios X (FRX), no equipamento Niton XRF Analyzer marca Thermo Scientific. O ensaio foi conduzido a temperatura ambiente. Complementarmente, uma análise química dos metais presentes nas diversas frações granulométricas foi feita por Espectroscopia de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) em equipamento da marca Agilent Technologies, modelo 5110 para identificar a concentração de lítio presente em cada amostra. Para esta análise as amostras foram lixiviadas em água régia na relação sólido/líquido de 1/40 com auxílio do micro-ondas da Anton Paar modelo Multiwave 5000 com taxa de aquecimento de 15°C/min e temperatura de patamar de 230°C por 15min. Após lixiviação as amostras foram filtradas e diluídas 100 vezes para análise por ICP-OES, esta análise foi realizada em duplicata e os valores médios da concentração de lítio é apresentada.

A partir dos resultados obtidos na análise química, as frações que apresentaram maior concentração de lítio foram então unificadas em uma nova amostra representativa e uma análise complementar por difratometria de raios X foi realizada no difratômetro Aeris da Panalytical (com fonte de radiação Cu-K α com $\lambda = 1,54\text{\AA}$) em temperatura ambiente. Para esta análise o material catódico foi peneirado em malha de 0,045 mm (#325 mesh) e o pó passante nesta malha foi caracterizado.

3. Resultados e discussões

3.1 Desmontagem

A abertura manual, cortando toda a circunferência da carcaça metálica permitiu separar com relativa facilidade os componentes estratégicos do cátodo rico em compostos de lítio e eliminando uma considerável massa de material que pode passar por processos de reciclagem já consolidados industrialmente no âmbito de recuperação de matérias-primas como o aço da carcaça, os polímeros termoplásticos do invólucro e dos separadores das células de LFP e o grafite e cobre do ânodo.

Na Figura 3 pode ser vista uma célula aberta mostrando todos seus componentes de forma separada, com exceção do eletrólito que, por ser líquido, evapora ou se encontra impregnado na superfície dos demais componentes durante o processo de abertura.



Figura 3 - Componentes de uma célula de LFP. Em (1) a célula antes da abertura, (2) o invólucro polimérico, (3) carcaça de aço, (4) interconectores do cátodo e ânodo, (5) separador polimérico, (6) ânodo e em (7) cátodo.

Fonte: AUTOR, 2023.

O gráfico da Figura 4 apresenta uma relação em percentual mássico que cada componente da célula representa após processo de desmontagem. A célula fechada apresentou um peso de 133,57g e desse total, e o gráfico destaca os componentes que contribuem significativamente para compor a massa total da célula, e são estes: o cátodo (43%), o ânodo (25%) e a carcaça de aço (24%), ou seja, os materiais de maior valor agregado (cátodo e ânodo) correspondem a quase 70% da massa total da célula de LFP avaliada.

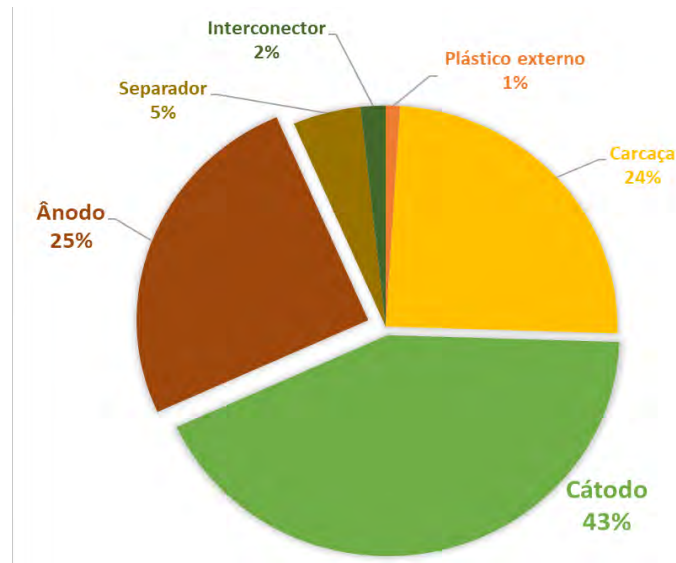


Figura 4 - Massa em percentual, dos componentes de uma célula de LFP após abertura manual.
Fonte: AUTOR, 2023.

3.2 Cominuição e Separação Granulométrica

Com relação ao material catódico separado para o processo de moagem, este foi pesado antes e após moagem de facas, bem como foram somadas todas as frações separadas nas peneiras para avaliar as possíveis perdas de material durante o beneficiamento. A Figura 5 apresenta os resultados mensurados e destaca-se que, considerando a massa de cátodo obtida de 613,50 g, a perda de material após a moagem de facas corresponde a 0,34% e após o processo de separação granulométrica há uma perda final de 0,68% do componente catódico da célula sendo que a quantidade final de material peneirado e separado nas diversas frações granulométricas foi de 609,33 g.

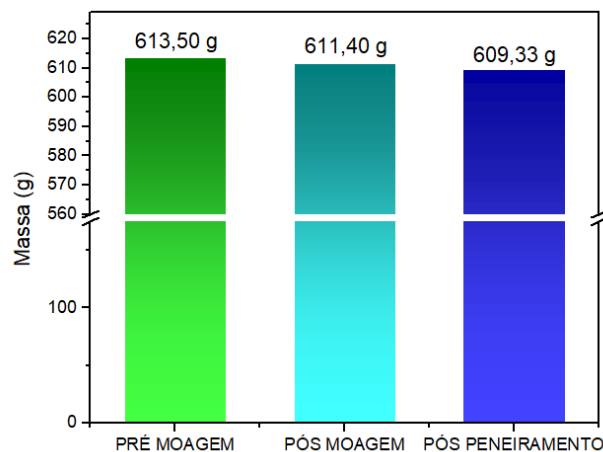


Figura 5 - Massa de cátodo antes e após processo de moagem e pós processo de peneiramento de todas as frações granulométrica.

Fonte: AUTOR, 2023

O processo de moagem proposto é efetivo em concentrar frações com granulometria mais fina, sendo que apenas 11,19% da massa de cátodo moído ficou retido nas malhas de granulometria 0,50 mm ou superior, conforme ilustra a Figura 6, com as proporções mássicas retidas nas peneiras granulométricas propostas neste trabalho.

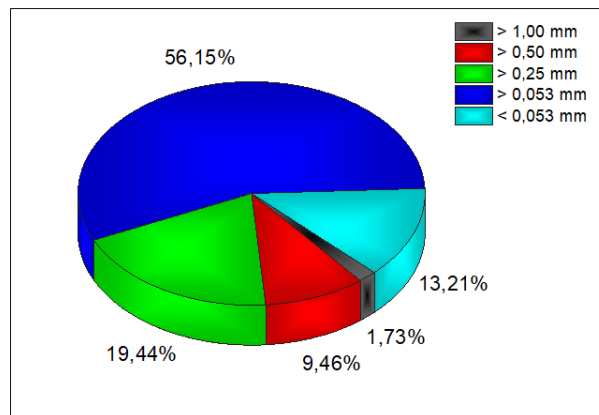


Figura 6 - Balanço de massa obtida na separação das frações granulométricas propostas.
Fonte: AUTOR, 2023

Com relação as frações granulométricas obtidas, a Figura 7 apresenta uma coleção de fotografias das amostras após passarem pelo processo de moagem de facas estabelecido.

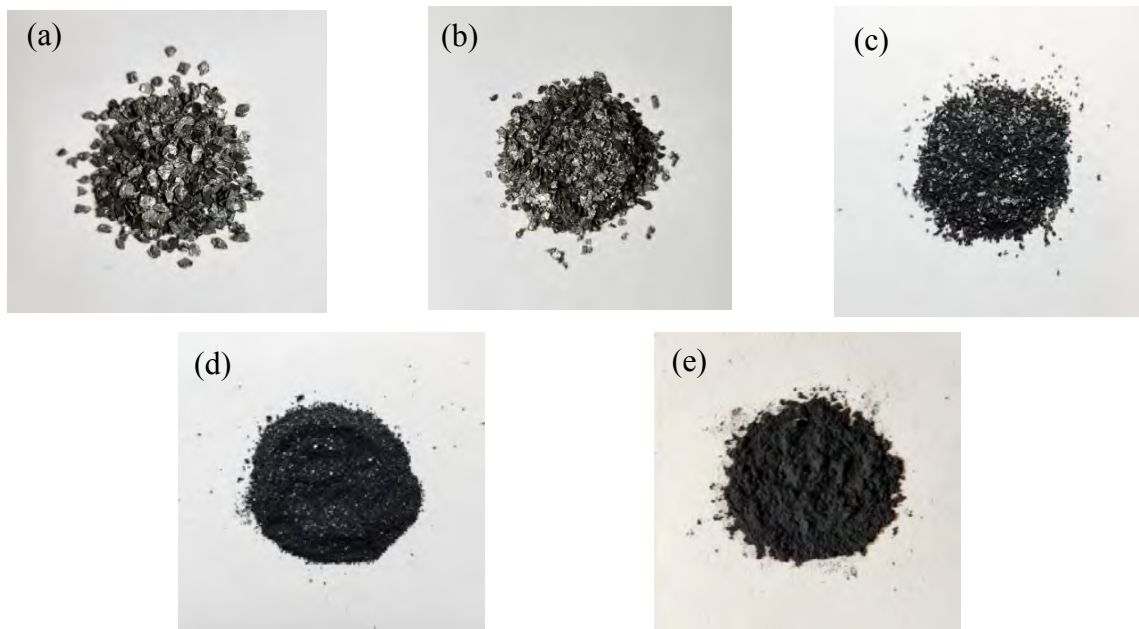


Figura 7. Fotografias das diferentes frações granulométricas obtidas a partir do processo de moagem de facas. Em (a) a fração > 1,00 mm, em (b) a fração > 0,5 mm, em (c) a fração > 0,25 mm, em (d) a fração > 0,053 mm e em (e) a fração < 0,053 mm.

Fonte: AUTOR, 2023



3.3 - Caracterização

A Tabela 1 apresenta o resultado obtido na análise por fluorescência de raios X para todas as frações granulométricas e, considerando apenas, os elementos químicos detectáveis por esta técnica e importantes nesta pesquisa. Se constata que nas frações de granulometria mais grosseira há um maior teor de alumínio se comparado as frações mais finas, o que reforça o que se inferiu a partir da observação visual das amostras separadas, isto é, as frações: > 1,00 mm e > 0,5 mm apresentam maior percentual de alumínio do que ferro e fósforo, indicando que as metodologias de moagem e peneiramento propostas são efetivas na separação do substrato de alumínio do cátodo de LiFePO₄ propriamente dito.

Fração	Composição (%)			
	Cu	Fe	Al	P
> 1,00 mm	0,075 ± 0,008	15,901 ± 0,446	28,765 ± 0,708	7,908 ± 0,157
> 0,50 mm	0,059 ± 0,007	15,257 ± 1,561	27,963 ± 4,508	8,391 ± 1,008
> 0,25 mm	0,035 ± 0,008	28,119 ± 0,209	2,012 ± 1,207	11,285 ± 0,396
> 0,053 mm	0,035 ± 0,001	29,703 ± 0,113	0,580 ± 0,043	12,168 ± 0,285
< 0,053 mm	0,055 ± 0,003	28,640 ± 0,029	0,410 ± 0,068	11,382 ± 0,157

Tabela 1. Composição química elementar e percentual obtida por FRX para os elementos Cu, Fe, Al e P presentes nas diferentes frações granulométricas produzidas.

Fonte: AUTOR, 2023

Para mapear efetivamente onde está acumulada a maior concentração ou teor de lítio nas frações granulométricas produzidas a análise química por ICP-OES serve como principal recurso analítico. Nesse sentido, as Figuras 8 (a) e (b) revelam dados importantes para guiar o processo de cominuição e separação granulométrica.

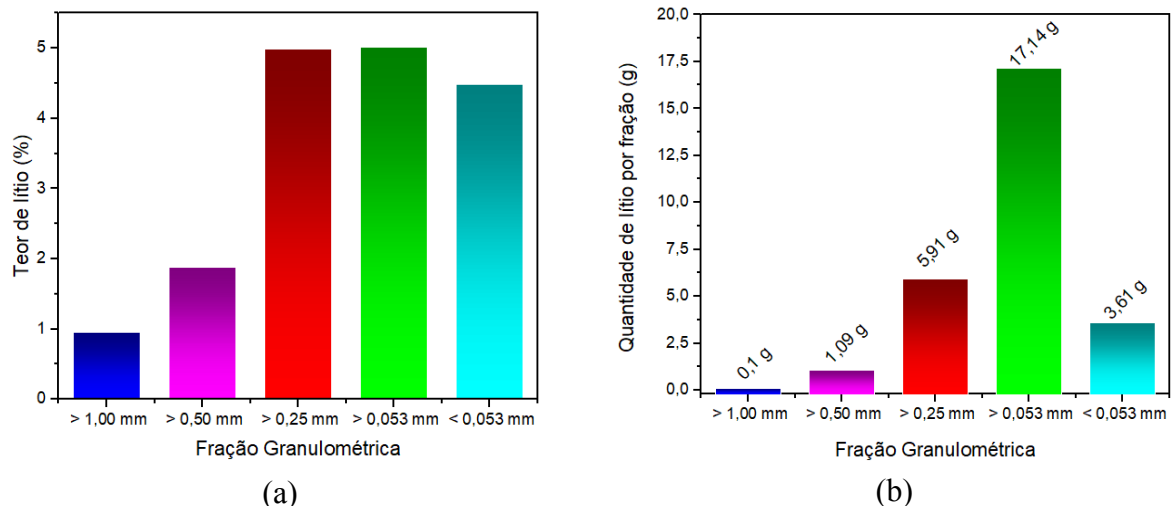


Figura 8. Análise da composição química das frações granulométricas obtidas por ICP-OES em termos do teor percentual de lítio (a) e quantidade mássica de lítio (b) detetadas.

Fonte: AUTOR, 2023

Na Figura 8 (a) é possível observar a variação do teor de lítio em valores percentuais para cada uma das frações e percebe-se que as frações mais grosseiras, isto é, a $> 1,00$ mm e a $> 0,5$ mm apresentam baixos teores de lítio e estas frações representam aproximadamente cerca de 10% da massa total de uma célula de LFP (Figura 6). Concomitantemente, a Figura 8 (b) revela que nas frações mais finas, ou seja, da fração $> 0,25$ mm para baixo há uma significativa concentração em massa de lítio. Considerando que em 609,33 g de material catódico obtido há 27,84 g de lítio, nas frações $> 0,25$ mm, $> 0,053$ mm e $< 0,053$ mm há 26,66g de lítio, ou seja, nestas frações de granulometria mais fina consegue concentrar cerca de 96 % de todo o lítio presente. Esses achados sugerem que o processo de moagem é eficiente e que o processo de peneiramento pode ser otimizado reduzido o número de peneiras a somente uma, a peneira de malha 0,5 mm e que todo material que passar por esta peneira terá uma significativa concentração de compostos ricos em lítio para posterior recuperação.

Por fim a Figura 9 apresenta o difratograma de raios X da amostra que compreende a mistura de todas as frações granulométricas com maior quantidade de lítio, ou seja, as frações menores que 0,5 mm ($> 0,25$ mm, $> 0,053$ mm e $< 0,053$ mm).

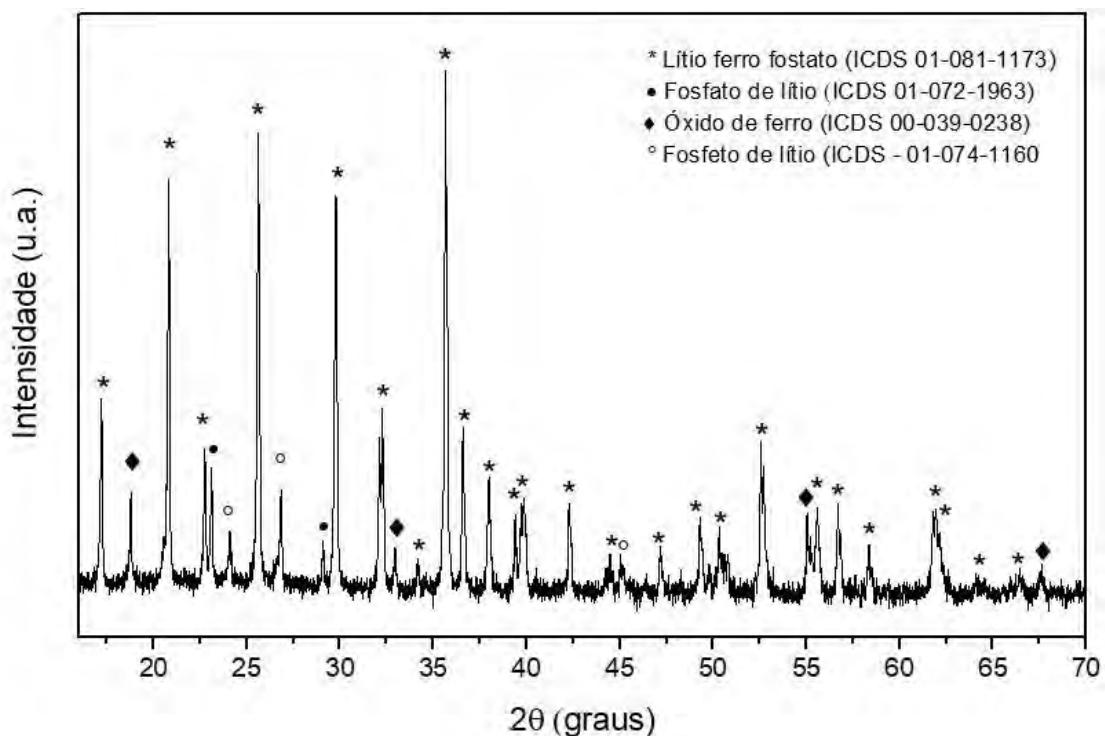


Figura 9. Difratograma de raios X dos pós catódicos moídos e peneirados com granulometria menor que 0,5 mm (mistura das frações ($> 0,25$ mm, $> 0,053$ mm e $< 0,053$ mm)).

Fonte: AUTOR, 2023

No difratograma da Figura 9 se observa claramente a presença da fase cristalina lítio ferro fosfato o que indica a efetiva concentração deste composto pelo processo de moagem e peneiramento proposto. Também se observa a presença de outras fases



crystalinas como o fosfato de lítio, o fosfeto de lítio e óxido de ferro, compostos que se formam, provavelmente, durante o processo de degradação pós uso das células de LFP empregadas neste estudo.

3. Considerações Finais

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, verificou-se que a abertura manual das baterias, visando a remoção dos diversos constituintes das células de LFP, traz como vantagem a fácil concentração de frações ricas em compostos de lítio a partir de processos de moagem e peneiramento simples. Neste trabalho obteve-se quase 96% de concentração de compostos de lítio em uma fração granulométrica inferior a 0,5mm. O processo de remoção da carcaça metálica para segregação do material catódico facilitou a recuperação integral das bobinas do cátodo e isso é um indicativo de que o desenvolvimento de um processo mecanizado e/ou automatizado para remoção da carcaça de aço das células de LFP, pode ser promissor para otimizar a desmontagem e recuperação das bobinas de cátodo para posterior processo de cominuição e separação granulométrica de frações ricas em compostos de lítio.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) que fomenta esta pesquisa e seus pesquisadores sob o processo: 407788/2022-0 da chamada N° 27/2022.

Referências

Adão Benvindo da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina Alves França “**Tratamento de Minérios**” – 5ª Edição/Ed.- Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

Baran, J. “**COBALTO: UN ELEMENTO CRÍTICO Y ESTRATÉGICO**”. Anales. Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat., tomo 70, 77-106., 2018

Chen, K. et al. **Practical failure recognition model of lithium-ion batteries based on partial charging process**. Energy, v. 138, p. 1199–1208, 1 nov. 2017.

Custódio, Thais. “**Mundo terá 145 milhões de veículos elétricos em 2030.**” *Energia Hoje*, 30 Apr.2021, Disponível em: <https://energiahoje.editorabrasilenergia.com.br/mundo-tera-145-milhoes-de-veiculos-eletricos-em-2030-aponta-aie/>.

Ferreira, Lidi. “**O trabalho infantil nas minas da República Democrática do Congo**”. Criança Livre de Trabalho Infantil, [s.d.]. Disponível em: <http://livredetrabalho infantil.org.br/noticias/reportagens/o-trabalho-infantil-nas-minas-da-republica-democratica-do-congo/> Acesso em: 12 ago. 2023



Gu, F. et al. “**An investigation of the current status of recycling spent lithium-ion batteries from consumer electronics in China.**” *Journal of Cleaner Production*, v. 161, p. 765–780, 10 set. 2017.

Guimarães, B. C. B. “**Lítio: saiba mais sobre esse elemento químico**”. Saga Consultoria, 31 maio 2022. Disponível em: <https://sagaconsultoria.com/litio-saiba-mais-sobre-esse-elemento-quimico/>. Acesso em: 14 ago. 2023

IEA. *Global EV Outlook 2021*. International Energy Agency.

Madeira, Lara. “**Oportunidades impulsionam mercado de veículos elétricos no Brasil.**” *Consumidor Moderno*, 1 June 2023, <https://www.consumidormoderno.com.br/2023/06/01/mobilidade-eletrica-oportunidades-impulsionam-mercado-de-veiculos-eletricos-no-brasil/>.

MINING.COM, “**Cobalt is the king of critical metals**”. MINING.COM, 31 ago. 2011. Disponível em: <https://www.mining.com/cobalt-is-the-king-of-critical-metals/>. Acesso em: 13 ago. 2023

Torresi, R. “**Armazenamento Eletroquímico de energia**”. Instituto de Química, Universidade de São Paulo, 2017

U.S. Geological Survey. “**Mineral commodity summaries**”, February, 2019. Disponível em: https://prd-wret.s3-us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/atoms/files/mcs2019_all.pdf
Acesso em: 16 ago. 2023

Zheng, H. et al. “**Selective Extraction of Lithium from Spent Lithium Batteries by Functional Ionic Liquid.**” *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, n. 20, p. 7022–7029, 24 maio 2021.



ESTUDO DA SEPARAÇÃO DE LEDS DE MÓDULOS ORIUNDOS DE UMA UNIDADE DE TRIAGEM DE PORTO ALEGRE

Emanuele Caroline Araujo dos Santos^{1*}; Aline Deitos²; Daiane Calheiro Evaldt³;
Feliciane Andrade Brehm⁴; Carlos Alberto Mendes Moraes⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS
*emanuelec@edu.unisinos.br

Resumo

As lâmpadas LED são muito consumidas e necessárias para a sociedade, impactando no aumento da geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e conseqüentemente em impactos ambientais. Após seu consumo podem ser consideradas fontes secundárias de materiais, sendo necessário pensar a forma com que esses retornem para a cadeia produtiva, envolvendo desde a desmontagem até a recuperação dos metais. A etapa de retirada dos LEDs do módulo LED (componente de LED + placa base) é considerada a etapa mais difícil do processo. Com isso, o objetivo principal deste trabalho foi estudar um método viável de separação de LEDs de seu módulo, visando a melhor recuperação de metais, bem como um processo que possa ser aplicado em uma cooperativa ou Unidade de Triagem (UT). A metodologia empregada envolveu a capacitação e obtenção dos módulos de LED junto a uma UT, retirada em chapa aquecedora em diferentes temperaturas, moagem dos LEDs, e caracterização química através da Fluorescência de Raios-X. Com os testes de retirada dos LEDs em diferentes temperaturas aliado a caracterização química, pode-se verificar a utilização de diferentes composições de soldas nas conexões LED-Placa base, em que alguns módulos (os retirados á 150°C) detectou-se a presença de Chumbo (Pb), já os retirados à 200°C são fabricados livre de Pb atendendo a normas internacionais que restringem seu uso. Além disso, percebeu-se a necessidade do desenvolvimento de um processo de retirada dos LEDs viável para as UTs bem como o potencial de geração de renda com a reciclagem de todos os materiais das lâmpadas.

Palavras-chave: Lâmpadas LED; Desmontagem; Módulo de LED; Solda de chumbo.

1. Introdução

O desenvolvimento econômico global possui uma relação no consumo de equipamentos eletroeletrônicos uma vez que se torna necessário para a sociedade moderna. A geração global dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em 2019 foi de 53,6 Mt (FORTI *et al.*, 2020). As lâmpadas e luminárias de LED são equipamentos eletroeletrônicos (EEE), compostas por uma série de LED iguais, montados em série ou paralelo, com alto fluxo luminoso. Elas necessitam de um sistema de acionamento ou fonte de alimentação (driver) para seu funcionamento (ABILUX, 2023).

O Global E-waste Monitor de 2020 aborda 6 categorias de REEE, em que uma é exclusivamente de lâmpadas, incluídas as LED (FORTI *et al.*, 2020). Para esta categoria eles quantificaram uma geração global de 0,9 Mt de lâmpadas, incluindo as lâmpadas



LED. Cabe destacar que desde 2014 houve aumento de mais de 4% na categoria de lâmpadas e pequenos equipamentos (FORTI *et al.*, 2020).

A recuperação dos materiais dessas lâmpadas é importante do ponto de vista de efeitos ambientais e para reciclagem de materiais uma vez que apresentam metais de grande valor econômico e/ou críticos, como o ouro, prata, gálio, índio e terras raras, além de metais em maior volume e que também tem valor econômico, como cobre, ferro e alumínio, com isso, podem ser considerados como um minério secundário, e em alguns casos apresentam maiores teores de metais preciosos do que o próprio minério de origem. (PRADIIAN, 2013; NICOLAI, 2016; POURHOSSEIN; MOUSAVI, 2018; SANTOS, 2021).

Para a logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos é fundamental a etapa de desmontagem visto que ocorre a separação em diferentes partes podendo identificar alguns materiais (SILVEIRA; SANTOS; MORAES, 2019).

O processo de desmontagem das lâmpadas LED tem suas dificuldades já que se trata de um resíduo heterogêneo e complexo, sobretudo com relação a variações de *design* entre as marcas e a forma de montagem dos LEDs, em que os *chips* de LED encontra-se encapsulados por outros materiais, sendo denominado componente de LED (POURHOSSEIN; MOUSAVI, 2018; BOSSCHE *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2020; ABILUX, 2023).

Para uso em lâmpadas e luminárias em geral os componentes de LED são montados em uma placa de alumínio, onde o conjunto (LED+Placa) é denominado módulo de LED, além deste módulo, é aplicada uma camada de cobre para conduzir eletricidade e um filme orgânico isolante (ABILUX, 2023; ILLÈS; KÈKESI, 2023).

A etapa de retirada dos LED é considerada a etapa mais difícil do processo de desmontagem de lâmpadas LED. Existem alguns estudos que utilizaram estilete para este processo (SANTOS *et al.*, 2019; CENCI, 2020; OLIVEIRA, 2022). Porém este procedimento não é o ideal, pois além de haver grande perda de material, em que muitos LEDs se quebram ou saem incompletos, este processo pode causar riscos de acidentes aos que estão manuseando (SANTOS *et al.*, 2019). Outro ponto fundamental era o tempo que demandava esta etapa, inviabilizando uma produtividade aceitável para as cooperativas. (SANTOS, 2021; SANTOS *et al.*, 2022). Contudo, esta etapa é muito importante, para a recuperação dos metais críticos contidos nos LEDs, pois concentra melhor os mesmos, enquanto que ao aplicar técnicas de recuperação em todo módulo de LED, alguns metais que se encontram em pequenas concentrações podem se diluir (SANTOS *et al.*, 2019; SANTOS, 2021) e, para uma possível reutilização dos componentes de LEDs (WEHBIE; SEMETHEY, 2022). De acordo com Santos (2021) e Santos *et al.* (2022), como não existe uma tecnologia consolidada para reciclagem de LEDs, eles podem acabar entrando no ciclo de reciclagem do alumínio, juntamente com sua placa “base”.

Os componentes de LED são fixados nas placas “base” por meio de solda, em que esta pode variar a sua composição (MARTINS; TANABE; BERTUOL; 2020; WEHBIE; SEMETHEY, 2022; ILLÈS; KÈKESI, 2023). De acordo com Wehbie e Semetey (2022) as soldas de estanho-chumbo (SnPb) são largamente utilizadas em aplicações eletrônicas devido ao seu baixo ponto de fusão, baixo custo e demais propriedades de soldagem. No entanto, esta liga tem sido gradativamente substituída, especialmente na União Européia



e Estados Unidos, Diretiva 2011/65/EU denominada de Restriction of the use of certain hazardous substances (RoHS), que restringe o uso de algumas substâncias perigosas, como o chumbo, para aplicação em produtos eletroeletrônicos desde 2006 (CHENG; HUANG; PECHT, 2017; HoHS, 2011; WEHBIE; SEMETHEY, 2022; ILLÈS; KÈKESI, 2023).

Com isso, a liga de estanho-prata-cobre (SnAgCu) têm sido a principal solda utilizada para substituição das soldas com chumbo, em geral na proporção 96.5Sn3.0Ag0.5Cu (CHENG; HUANG; PECHT, 2017; ILLÈS; KÈKESI, 2023). Porém com o uso de 3,0% em peso de Ag, outros materiais mais baratos têm sido procurados para substituição, especialmente em aplicações menos complexas, de curta vida útil e baixo custo (CHENG; HUANG; PECHT, 2017). Outro material que tem sido utilizado para substituição do chumbo é o bismuto (Bi) que possui ponto de fusão baixo (WEHBIE; SEMETHEY, 2022).

Com isso, o objetivo principal deste trabalho foi estudar um método viável de separação de LEDs de seu módulo, visando a melhor recuperação de metais, bem como um processo que possa ser aplicado facilmente em uma cooperativa ou Unidade de Triagem (UT) e caracterização química dos LEDs obtidos neste processo.

2. Metodologia

A seguir a metodologia empregada será apresentada.

2.1 Capacitação e Preparação de Materiais

O Grupo de Pesquisa NucMat da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (Unisinos) realizou uma capacitação para alguns trabalhadores de uma Unidade de Triagem (UT) do município de Porto Alegre no estado do Rio Grande do Sul, abordando tópicos como a segurança, armazenamento, desmontagem de REEE, dentre outros. Essa capacitação teve como objetivo principal a desmontagem das lâmpadas LED visando a reciclagem de seus componentes.

Uma vez que os LEDs ainda não possuem tecnologia de reciclagem e recuperação de metais consolidadas, tão pouco mercado (SANTOS, 2021), a UT passou a separar as placas de LED para o grupo de pesquisa.

Deste modo, para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizadas apenas as placas de LED, de lâmpadas tipo bulbo majoritariamente e luminárias diversas, provenientes da UT. O grupo de pesquisa realizou a retirada dos LEDs das placas e posteriormente devolveu para a UT apenas as placas limpas para eles comercializarem o material. No total foram desmontadas 239 placas de LED para este estudo.

2.2 Retirada dos LEDs

A retirada dos LEDs se deu em uma chapa aquecedora, marca Warmnest, modelo DB-IVA, em que as placas foram aquecidas até 150 e 200°C. Assim que a placa atingia a temperatura programada fazia-se um teste de retirada dos LEDs para verificar se estavam soltando, com ajuda de uma pinça, e em caso positivo, eles eram todos retirados também com a pinça. O processo foi realizado dentro de uma capela com exaustor ligado.

A Figura 1 ilustra como foi realizada a retirada dos LEDs com o uso de placa de aquecimento.



Figura 1 – Retirada dos LEDs com uso de placa de aquecimento
Fonte: AUTOR, 2023.

2.3 Moagem

Os LEDs obtidos no item 2.2 foram moídos em um moinho de bancada, marca Janke & Kunkel, por cerca de 3 minutos, no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) na Unisinos. Esta etapa teve por objetivo gerar amostras mais homogêneas para caracterização química e posterior trabalho de recuperação de metais.

2.4 Caracterização química

A caracterização química qualitativa da fase inorgânica dos materiais deste trabalho se deu por Fluorescência de Raios-X (FRX), pois além de ser uma análise rápida, o objetivo foi identificar preliminarmente os materiais constituintes dos LEDs bem como verificar a diferença de composição em placas (soldas) e LEDs que soltaram em diferentes temperaturas.

Esta técnica foi realizada também no LCVMat na Unisinos utilizando o equipamento espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva, modelo EDX 720 HS, marca Shimadzu.

Os LED foram primeiramente moídos conforme item 2.3 e analisados separadamente os LED soltos a 150 e 200°C e misturados, ou seja, uniram-se os dois tipos a fim de se obter uma amostra homogênea. Além disso, realizou-se análise sobre as placas de LED no local, de onde os LED foram soltos, ou seja, na solda. Também realizou-se FRX em um material de difícil moagem encontrado na etapa de cominuição.

3. Resultados

Os resultados obtidos serão apresentados a seguir.

3.1 Valorização das lâmpadas LED pós consumo na UT



Após a capacitação realizada, a UT passou a desmontar as lâmpadas LED pós consumo, que são descartadas juntamente com os resíduos da coleta seletiva que chegam até elas. Hoje, a UT vende para empresas de reciclagem praticamente todos os materiais constituintes das lâmpadas, exceto os LEDs.

No entanto, logo após este estudo a UT passou a comercializar os módulos de LED, em que são vendidos juntamente com o alumínio ou placas de circuito impresso (PCI), geralmente como sucata de alumínio, em que o LED acaba entrando como contaminante, e outros compradores interessados também nos LEDs mas sem um detalhamento para sua aplicação. De qualquer forma, esta valorização no mercado é ainda muito volátil, ou seja, tem períodos que a cooperativa consegue comercializar e em outros não (isto também acontece com o bulbo). Esta prática também ocorreu em outras cooperativas que foram visitadas e vai ao encontro com o que previu a literatura (SANTOS 2021; SANTOS *et al.*, 2022). Já em algumas cooperativas este mercado é inexistente.

Com isso, a lâmpada LED passou a ser considerada um material reciclável de interesse para as UT, gerador de trabalho e renda, mas com irregularidade de demanda e oferta ainda. A Tabela 1, retirada de Santos *et al.* (2022), demonstra quanto a UT pode receber com a venda de 1kg de cada material constituinte da lâmpada.

Material	Valor/kg
Alumínio não contaminado	R\$ 3,50
Alumínio contaminado	R\$ 3,00 – 2,80
Polímeros	R\$ 1,20
PCI	R\$ 7,00

Tabela 1 – Preço por quilo de cada material (considerou-se alumínio contaminado, o material que apresenta outros materiais misturados e alumínio não contaminado os que não apresentam esta mistura)

Fonte: SANTOS *et al.*, 2022.

De acordo com Santos *et al.* (2022), com estes valores, um trabalhador de cooperativa, ao desmontar 2400 lâmpadas LED tipo bulbo por mês, poderia gerar R\$ 360,00/ mês para a cooperativa.

Contudo, salienta-se a preocupação com a destinação que tem sido adotada para os LEDs, uma vez que ao entrar no ciclo de reciclagem do alumínio, os metais críticos e preciosos presentes neles serão diluídos e perdidos, e como comentado viram contaminantes na fusão de alumínio. Sendo, por isso, urgente o desenvolvimento e aplicação de uma tecnologia econômica e ambientalmente adequada de recuperação destes metais.

3.2 Retirada dos LEDs

A retirada dos LEDs da placa de alumínio base é uma tarefa considerada difícil. (SANTOS *et al.*, 2019). Em trabalhos anteriores este processo se dava com a utilização de um estilete, porém além dos riscos de acidentes que tal procedimento acarreta, haviam muitas perdas, pois os LEDs se desmanchavam e/ ou se perdiam e/ou saíam incompletos (restando partes importantes dos LEDs na placa). Outro ponto fundamental era o tempo

que demandava esta etapa, inviabilizando uma produtividade aceitável para as cooperativas. No entanto, não foi relatado nos trabalhos citados o tempo exato demandado para este procedimento, por não ser o objetivo dos trabalhos.

Conforme ilustrado na Figura 2, a retirada dos LEDs por meio de placa de aquecimento mostrou-se mais eficiente, pois proporcionou a retirada completa dos mesmos. Além disso, a Figura 2 ilustra também um LED retirado inteiro. Sob o ponto de vista de uma possível reutilização dos LEDs, este processo é mais indicado em relação ao mecânico (estilete) (WEHBIE; SEMETEY, 2022). E sob o ponto de vista de recuperação de metais, em que uma etapa de cominuição será utilizada, a retirada do LED inteiro não é necessária, porém ainda assim aspectos como a perda de parte dos materiais do LED bem como tempo de trabalho e segurança devem ser considerados no sentido de se tornar uma prática em cooperativas (CENCI, 2020; OLIVEIRA, 2022; SANTOS *et al.*, 2019; SANTOS *et al.*, 2021; SANTOS *et al.*, 2022).



Figura 2 – Retirada dos LEDs com uso de estilete *versus* placa de aquecimento e LED solto inteiro
Fonte: AUTOR, 2023.

Isto posto, verificou-se que os LEDs se soltam facilmente da placa base a qual estavam soldados, necessitando apenas o auxílio de uma pinça de ponta fina para retirá-lo sem nenhuma dificuldade. Porém, em um primeiro teste, se observou diferença na temperatura de fusão das soldas, em que alguns soltavam ao chegar a uma temperatura de 150 °C e outros a 200 °C. O tempo para soltura completa dos LEDs foi de cerca de 5-10 min. para a temperatura 150 °C e cerca de 3 min. para temperatura de 200°C.

Uma pequena porção (3%) não soltou em nenhuma das duas temperaturas e nomeou-as de >200°C, estas não seguiram para as próximas etapas deste estudo, neste momento, devido a pouca quantidade obtida.

A Figura 3 apresenta a proporção de LEDs soltos à 150, 200 e acima de 200°C.

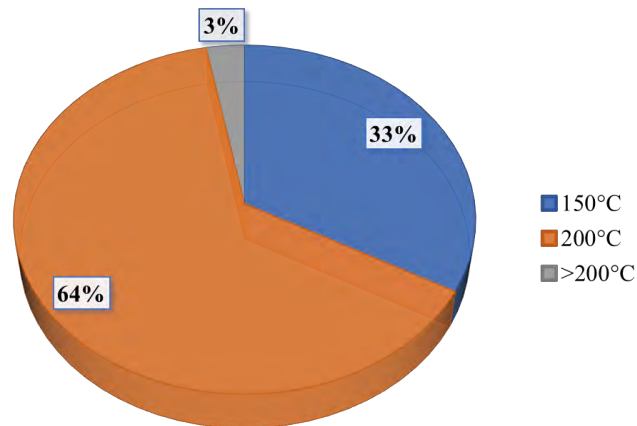


Figura 3 – Proporção de LEDs soltos à 150, 200 ou >200°C.
Fonte: AUTOR, 2023.

Conforme pode ser verificado no gráfico da Figura 3, dos 239 módulos 153 (64%) soltaram à 200°C, 79 (33%) à 150°C e apenas 7 (3%), não soltaram em nenhuma das duas temperaturas.

De acordo com Wehbie e Semetey (2022), a utilização de dessoldagem por aquecimento é uma forma eficiente de separar componentes eletrônicos, embora haja risco de danificá-los, e a temperatura de dessoldagem está diretamente ligada à composição química da solda.

3.3 Moagem

A cominuição em moinho de facas de bancada foi eficiente, havendo uma perda menor que 1%, além de propiciar a separação de materiais. O processo mostrou-se relativamente fácil, pois em pouco tempo (cerca de 5 min.) pode-se obter uma amostra diminuída e homogênea.

No entanto, observou-se a presença de um metal de difícil moagem, neste tipo de moinho, em que o mesmo ficou inteiro após o processo. A Figura 4 apresenta os LEDs moídos, bem como destaca o material de difícil moagem.



Figura 4 – LEDs moídos e material de difícil moagem.
Fonte: AUTOR, 2023.



3.4 Caracterização química

A Tabela 2 apresenta os resultados qualitativos de FRX dos LEDs soltos à 150 e 200°C, deles misturados, das placas no local da solda e do material não moído.

Material	(>50%)	(5% < x < 50%)	(< 5%)
LED 150°C	-	Ti, Si, Sn, Cu, Y	Ca, Pb, Al, Zn, Ga, Ag, Bi, Fe, Mg, Ni, Sr, P, Cr, Mn, Br
LED 200°C	-	Ti, Si, Cu, Sn, Y, Ca	Ga, Al, Ag, Fe, Zn, Ni, Mg, Pb, Sr, P, Bi, Cr, Ac, Th, Mn, Br
LEDs misturados	-	Ti, Si, Sn, Cu, Y	Ca, Al, Ga, Ag, Pb, Zn, Fe, I, Bi, Ni, Sr, P, Cr, Mn, Br, Zr
Placa de LED 200°C	Sn	Si	Ca, Ag, Cu, Bi, Th, Br
Placa de LED 150°C	Sn	Pb	Ra, Ti, Cu, Ag, Ni
Material não moído	Cu	Fe, Ni	Ag, Sn, Cr, Mn, Y

Tabela 2 – FRX dos LEDs soltos a diferentes temperaturas, misturados, das placas no local da solda e material não moído

Fonte: AUTOR, 2023.

Conforme pode-se observar pela Tabela 2, os LEDs, independente da solda utilizada, apresentam ítrio (Y), gálio (Ga), prata (Ag), assim como outros elementos característicos de sua composição, já verificados pela literatura, como titânio (Ti), cálcio (Ca), alumínio (Al), bromo (Br), dentre outros. (OLIVEIRA; BENVENUTI; ESPINOSA, 2021; REBELLO; XAVIER, 2022; BALINSKI *et al.*, 2022; ILLÉS; KÉKESI, 2023). O Pb apareceu em todas as amostras de LEDs.

Nas placas de LED, onde a análise de FRX foi realizada em cima somente da solda, verifica-se a presença de Sn como elemento majoritário (>50%) em ambas as amostras, porém o Pb foi detectado somente nas que soltaram à 150°C e como material intermediário (5% < x < 50%). Embora tenham sido detectados Ag e Cu como elementos traços (<5%), pode-se inferir se tratar de uma solda SnPb.

Nas placas de solda que se fundiram a 200 °C não foi detectado presença de Pb. Somando a presença de Ag e Cu como elementos traços pode-se inferir que se trata de uma solda SnAgCu. Nessa amostra também detectou-se Bi que embora possa ser considerado um contaminante, tem sido relatado pela literatura como potencial aditivo em soldas livres de Pb e mais econômicas (CHENG; HUANG; PECHT, 2017; WEHBIE; SEMETEVY 2022; ILLÉS; KÉKESI, 2023).

Cenci (2020) verificou em seu estudo através da análise de ICP-OES a presença de chumbo em lâmpadas de LED tipo bulbo no módulo de LED (concentração de 0,001%) enquanto que em modelo tipo tubular estavam presentes nos LEDs (concentração de 1,025%), PCIs (concentração de 0,233%) e módulo de LED (concentração de 0,011%). A presença de chumbo geralmente é de acordo com cada fabricante e empregado como solda (CENCI, 2020).

De acordo com Cheng, Huang e Pecht, (2017), devido às suas boas propriedades de soldagem, manufaturabilidade, confiabilidade e preço, por mais de 50 anos a solda de SnPb tem sido usada para montagem de eletrônicos. Porém devido a toxicidade do Pb ele



passou a ser eliminado das soldas de eletroeletrônicos de consumo, a partir de 2006 com a diretiva RoHS da União Européia, e posteriormente passou a ser restringido em outros produtos e países.

Com isso, houve uma corrida em desenvolver e eleger uma liga livre de Pb, com propriedades e custo aceitáveis. Assim, a liga SAC305 (composta por 96,5% de Sn, 3,0% de Ag e 0,5% de Cu) foi eleita a liga padrão para a indústria eletrônica. Esta liga apresenta ponto de fusão de 217°C (CHENG; HUANG; PECHT, 2017).

No Brasil ainda não há definição de restrições quanto ao uso de substâncias perigosas nos EEE. Em 2018 um grupo de trabalho elaborou uma minuta de normativa com base na União Europeia com regras similares para restringir o uso destas substâncias, uma vez que é necessário desenvolver mecanismos de proteção, tanto para as pessoas envolvidas na fabricação e na reciclagem quanto os consumidores que fazem o uso destes produtos, e estabelecer estratégias nacionais para a gestão dos mesmos. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA, 2017; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2023?).

Illés e Kékesi (2023) verificaram através de análise de EDS soldas com ligas de Sn-Pb entre os LEDs e as placas base, sendo a proporção 45,14 Sn e 54,86 Pb em wt%. Para separação dos LEDs de suas placas, estes autores utilizaram um banho ácido com água régia, em que o óxido de estanho precipitou e o Pb e a Ag foram dissolvidos, sendo removidos com a adição de sais de NaCl e Na₂SO₄ (ILLÉS; KÉKESI, 2023). Embora os autores tenham tido sucesso, este processo gera um efluente líquido que deve ser tratado posteriormente.

Martins, Tanabe e Bertuol (2020) realizaram a separação dos LEDs de sua placa base utilizando uma placa de chapa de aquecimento a uma temperatura de 200°C durante 5 min e uso de um bastão de vidro para retirar os chips de LED. Os autores também encontraram soldas de contendo Sn, Ag e Pb, além de Cu, por mapeamento via MEV e EDS. (MARTINS; TANABE; BERTUOL, 2020).

Wehbie and Semetey (2022) realizaram dessoldagem por meio de placa de aquecimento e forno, onde no experimento com forno os autores utilizaram uma temperatura inicial de 160°C por 10 minutos e de um total de 10 módulos, 4 soltaram e posteriormente elevando-se a temperatura para 260°C e mesmo tempo, o restante soltou. Já ao utilizar chapa de aquecimento eles aplicaram uma temperatura <240°C por 5 minutos e de 11 módulos todos foram dessoldados.

Ao realizar análise de EDS via MEV Wehbie and Semetey (2022) verificaram que os módulos de LED em que houve a dessoldagem em 160°C utilizavam soldas de BiSn, enquanto que os que soltaram à 260°C eram compostos somente por Sn. De acordo com eles e a literatura já exposta o Bi tem sido aplicado para substituir o Pb e proporcionar uma solda com ponto de fusão mais baixas, sendo que as soldas de Sn57Bi47 apresentam ponto de fusão de 138°C e as de Sn puro 231,9°C (WEHBIE; SEMETHEY, 2022).

Embora os dois processos, separação química e térmica, atendam ao objetivo de separação dos LEDs visando a posterior e melhor recuperação de metais contidos neles ou reutilização destes, deve-se levar em conta os impactos ambientais negativos causados durante cada técnica. Enquanto que o processo químico consome matérias-primas a mais e gere efluente líquidos ácidos, o processo térmico pode gerar emissões atmosféricas,



sendo necessário o uso de EPIs e sistemas de exaustão, sem contar o consumo energético atrelado a cada processo. De qualquer forma, deve-se pensar em um processo que seja viável e produtivo para as cooperativas e UTs, sendo que o material das placas significam uma fonte de renda para elas.

A partir dos resultados discutidos neste trabalho, evidencia-se a necessidade de aprofundar nos devidos impactos associados ao beneficiamento a partir de um balanço de massa e energia bem como na avaliação ambiental e econômica envolvendo os três processos (mecânico, químico e térmico), em que questões como consumo de energia, emissões atmosféricas, viabilidade técnica e econômica e de segurança e saúde do trabalho devem ser quantificados, levando em consideração rotas de trabalho escolhidas (ou seja, reutilização, reparação ou recuperação de materiais dos LEDs).

4. Considerações Finais

Após a capacitação realizada em uma UT, a realização de testes de retirada dos LED utilizando uma chapa aquecedora, moagem dos LED e caracterização química, têm-se as principais considerações:

- As lâmpadas LED são um resíduo de interesse econômico para cooperativas e UTs, pois representam um novo material a ser beneficiado e comercializado por elas. Após capacitação realizada em uma UT, ela já passou a separar os materiais das lâmpadas e comercializá-los;
- A venda dos módulos de LED diretamente para compradores de outros materiais, sem a separação prévia dos LEDs, torna-se uma ação negativa pois perdem-se materiais importantes e de valor agregado, tornando a necessidade da aplicação de uma técnica de recuperação viável mais urgente;
- A moagem dos LEDs em moedor de facas de bancada é possível e apresentou pouca perda de material (1%), embora parte do material metálico não tenha sido moído, pois para algumas técnicas de recuperação esta cominuição já poderia ser aplicada. No entanto, em alguns casos específicos e para análises em que o tamanho de partícula seja um determinante será necessário um novo método;
- A remoção dos LEDs em chapa aquecedora mostrou-se melhor do que a utilização de estilete tanto sob ponto de vista de otimização quanto de segurança;
- A diferença de temperatura na solda dos LEDs evidenciou a aplicação de diferentes soldas nos LEDs, em que muitos ainda utilizam Pb (33%), embora em pequenas quantidades deve ser evitado, devido a seu conhecido impacto negativo ao meio ambiente e saúde humana;
- A definição de uma norma, semelhante a RoHS no Brasil, poderia ocasionar a redução e eliminação do uso do Pb;
- Tendo em vista uma etapa de retirada dos LEDs, durante a desmontagem e valorização das lâmpadas pós consumo, dentro das UTs deve-se levar em conta os impactos causados por cada técnica, a viabilidade econômica e técnica, bem como otimização do processo;
- O presente trabalho terá como continuidade a avaliação econômica, ambiental e técnica, com o intuito de tomadas de decisão quanto ao processo de separação destes LEDs contemplando as diferentes rotas possíveis.



Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelas bolsas de DTI dos pesquisadores, doutorado, e de Pesquisadores em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora – DT2.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ILUMINAÇÃO (ABILUX). **Guia LED descomplicado**. 2023. Disponível em: https://www.abilux.com.br/docs/ABILUX_GuiaLED-Descomplicado_REV_052023.pdf. Acesso em: 31 jul. 2023

BALINSKI, A. *et al.* Liberation and Separation of Valuable Components from LED Modules: Presentation of Two Innovative Approaches. **Recycling**. v. 7, 2022.

BOSSCHE, A. V. *et al.* Recovery of Gallium, Indium, and Arsenic from Semiconductors Using Tribromide Ionic Liquids. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**. v. 7, n. 17, p. 14451-14459, 2019.

CENCI, Marcelo Pilotto. **CARACTERIZAÇÃO DE LÂMPADAS LED E CONCENTRAÇÃO DE MATERIAIS DE INTERESSE VISANDO A RECICLAGEM**. 2020. 109f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade do Rio Grande do Sul, RS, 2020.

CHENG, S., HUANG, C., PECHT, M. A review of lead-free solders for electronics applications. **Microelectronics Reliability**. v. 75, p. 77-95, 2017.

DIAS, M. P. **Avaliação do Emprego de Um Pré-Regulador Boost de Baixa Frequência do Acionamento de Leds de Iluminação**. 2012. 94f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, MG, 2012.

Directive 2011/65/UE of the European Parliament and of the Council. Of 8 July 2011 on Restriction of the use of certain hazardous substances. Official Journal L, 2011. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:174:0088:0110:PT:PDF>. Acesso em: 23 jul. 2023.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-Waste Monitor 2020 - Quantities, flows, and the circular economy potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020. Disponível em: <http://ewastemonitor.info/>. Acesso em: 23 jul. 2023.

ILLÉS, I. B., KÉKESI, T. A comprehensive aqueous processing of waste LED light bulbs to recover valuable metals and compounds. **Sustainable Materials and Technologies**. v. 35, 2023.

MARTINS, Thiago R.; TANABE, Eduardo H.; BERTUOL, Daniel A. Innovative method for the recycling of end-of-life LED bulbs by mechanical processing. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 161, 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE E MUDANÇA DO CLIMA. **Aberta consulta para empresas de eletrônicos**. 2017. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/noticia-acom-2017-12-2776>. Acesso em: 07 ago. 2023.



- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **RoHS Brasileira. 2023?**. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/seguranca-quimica/gestao-das-substancias-quimicas/rohs-brasileira.html>. Acesso em: 07 ago. 2023.
- NICOLAI, F. N. P. **Mineração urbana: avaliação da economicidade da recuperação de componentes ricos em Au a partir de resíduo eletrônico (e-waste)**. 2016. 242f. Tese (doutorado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Ouro Preto, MG, 2016.
- OLIVEIRA, R. P. **Recuperação de ítrio a partir de resíduos de lâmpadas de LED tubulares por rota hidrometalúrgica**. 2022. 146f. Tese (doutorado em Engenharia Química) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- OLIVEIRA, R. P.; BENVENUTI, J.; ESPINOSA, D. C. R. A review of the current progress in recycling technologies for gallium and rare earth elements from light-emitting diodes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, 2021.
- POURHOSSEIN, F.; MOUSAVI, S. M. Enhancement of copper, nickel, and gallium recovery from LED waste by adaptation of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Waste Management**. v. 79, p. 98-108, 2018.
- PRADIAN, J. K. **Environmental Impact Assessment and Bioleaching of Metals from Electronic Waste (E-Waste)**. 2013. Tese (Doutorado em Filosofia e Biotecnologia). Jaypee University of Information Technology, Wanknaghat, Índia, 2013.
- REBELLO, R. Z.; XAVIER, L. H. **Lâmpadas de LED: Legislação, caracterização e recuperação de metais**. In: XAVIER, L.H., OTTONI, M. (org). *Mineração Urbana: Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos*. 1a ed. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, CETEM/MCTI. 2021.
- SANTOS, E. C. A. **Avaliação Técnica, Econômica e Ambiental Para Recuperação de Materiais a Partir de Lâmpadas LED Pós-Consumo**. 2021. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS.
- SANTOS, E. C. A.; *et al.* BENEFICIAMENTO DE LÂMPADAS LED INSERVÍVEIS EM UMA COOPERATIVA DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS. **Mix Sustentável**. v. 8, n. 4, p. 63-67, 2022.
- SANTOS, E. C. A.; *et al.* **Desmontagem e caracterização de Lâmpadas LED para Recuperação de Materiais**. In: TULLIO, L. (Org.). *Gestão de Resíduos Sólidos 2*. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. E-book. Disponível em: < <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/desmontagem-e-caracterizacao-de-lampadas-led-para-recuperacao-de-materiais>>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- SILVEIRA, T. A.; SANTOS, E. C. A.; MORAES, C. A. M. **O Ecodesign e a Geração de Resíduos: Uma Abordagem Sobre os Eletroeletrônicos**. In: AGUILERA, J. G.; ZUFFO, A. M. (Org.). *A Preservação do Meio Ambiente e o Desenvolvimento Sustentável 2*. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. E-book. Disponível em: < <https://www.atenaeditora.com.br/wp-content/uploads/2019/08/Ebook-A-Preservacao-do-Meio-Ambiente-e-o-Desenvolvimento-Sustentavel-2-1.pdf>>. Acesso em: 19 jul. 2023.
- WEHBIE, M., SEMETEVY, V. Characterization of end-of-life LED lamps: Evaluation of reuse, repair and recycling potential. **Waste Management**. v. 141, p. 202-207, 2022.



ESTUDO DOS MÉTODOS PARA RECUPERAÇÃO DO NEODÍMIO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

KICH, A. M.^{1*}; MATTJE, M.²; MODOLO, R. C. E³; MORAES, C. A. M⁴ e BREHM, F. A⁵

¹ Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS/Instituto SENAI de Inovação em Engenharia de Polímeros; ² Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS; ³ Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS; ⁴ Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS; ⁵ Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

*agnesmitzikich@gmail.com

Resumo

O Neodímio (Nd) é um elemento terra rara (ETR) e uma das matérias-primas críticas utilizados em diversas aplicações, desde ímãs permanentes para hard disk drives (HDDs), turbinas eólicas, carros elétricos e outras aplicações voltadas para tecnologias de energia limpa. Esses produtos, após seu fim de vida útil, tornam-se um resíduo sólido e muitas vezes são descartados de maneira inadequada, possuindo potencial em impactar de forma negativa o meio ambiente e a saúde humana, pois apresentam em sua composição materiais considerados tóxicos. O objetivo do presente trabalho, foi realizar um mapeamento sistemático apresentando um panorama dos métodos atuais de recuperação do Nd. A revisão teve como foco as técnicas atuais de reciclagem, eficiência de recuperação e os principais locais do mundo onde esse assunto foi estudado. Utilizou-se um mapeamento sistemático com critérios previamente estabelecidos, em que foi selecionada uma única base de dados. Encontrou-se inicialmente 549 estudos e através de processos de triagem, 23 estudos foram selecionados. Nos estudos selecionados, as técnicas de recuperação através do processo hidrometalúrgico foram as mais citadas. Observou-se aumento de estudos a partir do ano 2022 e em todo o mundo, esse assunto é mais estudado na Ásia, principalmente na China.

Palavras-chave: Neodímio; Reciclagem; REEE.

1. Introdução

O crescimento da população e o rápido avanço tecnológico tem aumentado a geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) nas áreas urbanas. (GIESE *et. al.*, 2021). A rápida evolução das tecnologias das últimas décadas tem acelerado o processo de obsolescência programada dos equipamentos eletroeletrônicos (EEE), diminuindo ainda mais o ciclo de vida desses produtos. Os REEE possuem em sua composição substâncias consideradas perigosas (tais como, cromo, cádmio, mercúrio, zinco) e se, descartados de maneira incorreta, possuem potencial em causar impactos ambientais negativos e prejudicar a saúde dos seres vivos. (BLANCO *et al.*, 2021). A



falta de políticas públicas voltadas para o correto gerenciamento desses resíduos sólidos, tornou-se uma preocupação mundial. (GIESE *et. al.*, 2021).

No sentido de resolver estas questões, tem-se buscado o desenvolvimento de novas metodologias para promover a recuperação dos REEE, de forma a evitar a extração dos recursos naturais não renováveis e impedir o descarte inadequado de resíduos sólidos no meio ambiente. (BALDÉ *et. al.*, 2017; STALTER, 2022).

Os depósitos de REEE são conhecidos como minas urbanas, uma vez que estes resíduos sólidos apresentam uma quantidade expressiva de matérias-primas e metais com alto valor agregado que podem ser reaproveitados. (CARDOSO *et. al.*, 2016; GIESE *et. al.*, 2021). Os ETR estão entre as matérias-primas críticas com alto risco de abastecimento, não só relacionado a disponibilidade geológica, mas também a instabilidades geopolíticas dos países fornecedores e ao baixo potencial de substituição desses elementos. (ADIBI; LAFHAJ; PAYET, 2019). O Nd está entre os ETR de maior interesse devido a suas diversas aplicações que incluem tecnologias de energia limpa e renovável. (CIACCI *et. al.*, 2019). Uma alternativa para aumentar o fornecimento de Nd, tem sido a reciclagem de resíduos sólidos para a recuperação de elementos, tais como o Nd. (KHANOLKAR; MONDAL; TRIPATHY, 2021).

O Nd, quando utilizado de forma combinada com outros elementos, apresenta excelentes propriedades para produção de ímãs permanentes. Os ímãs de neodímio-ferro-boro (NdFeB) desempenham um papel de destaque em várias aplicações tecnológicas devido às suas excelentes propriedades magnéticas. (KAYA *et al.*, 2021).

Com o objetivo de resolver a crise de oferta de terras raras e outros elementos críticos, os pesquisadores estão se concentrando no desenvolvimento de alternativas para substituir os ETR de fonte natural. (KHANOLKAR; MONDAL; TRIPATHY, 2021). Nesse contexto, a recuperação de materiais a partir de fontes secundárias, seria uma oportunidade promissora. (DUSHYANTHA *et. al.*, 2020).

O presente estudo tem como objetivo a pesquisa teórica relacionada com as metodologias existentes para a recuperação de matérias-primas críticas. Nesse estudo o foco está em ETR, especialmente o Nd, visando sua potencial recuperação para inserção em processos produtivos para fabricação de novos ímãs. A metodologia aplicada limita-se ao mapeamento sistemático voltado para a recuperação de Nd, principalmente de ímãs de NdFeB presentes em *Hard Disk Drives* (HDDs) de computadores pós-consumo que são tratados como REEE. O mapeamento sistemático apresentado no desenvolvimento dessa pesquisa, rendeu ao final, 23 estudos relacionados com o assunto de interesse. Nesse mapeamento sistemático, além de chegar a uma conclusão final sobre o tema relacionado ao panorama das metodologias desenvolvidas para a recuperação de Nd, foram obtidos dados adicionais sobre a frequência das publicações, origem geopolítica dos estudos, as diferentes técnicas utilizadas bem como suas eficiências.

Destaca-se ainda, que esse estudo tem relação direta com os conceitos de produção mais limpa e fechamento de ciclo, em que um resíduos sólido será beneficiado para voltar para o mesmo processo produtivo. Salienta-se ainda que o estudo está de acordo com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da agenda de 2030, especialmente os ODS 9 – indústria inovação e infraestrutura, ODS 12 – consumo e produção sustentável e ODS 13 – combate às alterações climáticas.



2. Metodologia: Mapeamento Sistemático

Segundo Kitchenham (2004), mapeamento sistemático é um meio de avaliar e interpretar todas as pesquisas disponíveis que são relevantes para uma determinada questão de interesse, usando uma metodologia confiável para se obter resultados mais expressivos e com menos divergências quando comparado a outros estudos de revisão. Um mapeamento sistemático segue três etapas: planejamento da revisão, condução da revisão e apresentação de resultados. Para desenvolvimento desse estudo de pesquisa, as etapas gerais associadas à realização da revisão foram as seguintes:

- a) Identificação do tema do estudo a ser realizado;
- b) Seleção de estudos primários;
- c) Avaliação da qualidade dos estudos;
- d) Síntese dos dados vinculados as questões para direcionamento do mapeamento;
- e) Compilação dos resultados.

O objetivo principal de um mapeamento sistemático é encontrar o maior número possível de estudos primários relacionados às questões de pesquisa de interesse. Para atingir esse objetivo de forma mais assertiva, é indicado dividir as questões de pesquisa em individuais, ou seja, relacionadas com a população, período, resultados, metodologias, etc. (KITCHENHAM, 2004). As questões da pesquisa desse estudo foram definidas como questões gerais, específicas e estatísticas, conforme mostrado na tabela 1.

Questões	Detalhes
Geral	Quais os métodos utilizados para recuperação de Nd de REEEE?
Específica	Quais as metodologias de recuperação do Nd? É possível recuperar Nd de ímãs de REEE para retornar para produção de ímãs?
Estatística	Quantos artigos foram publicados por ano? Em quais países foram publicados?

Tabela 1 – Questões de pesquisa para mapeamento dos artigos
Fonte: AUTOR, 2023.

As questões gerais visavam buscar se existem estudos desenvolvidos para métodos de recuperação do Nd e quais seriam as técnicas atuais utilizadas. Utilizou-se questões específicas para identificar as metodologias existentes para a realização da recuperação de Nd, bem como demonstrado se realmente seria possível através da eficiência de extração dos materiais recuperados. Já as questões estatísticas, foram usadas para determinar a frequência de publicação nos últimos 5 anos e em quais países esses estudos foram desenvolvidos.

O processo de busca foi dividido em 3 partes principais: primeiramente, as *strings* de busca foram definidas, selecionou-se o banco de dados para a pesquisa dos estudos e, por fim, a aquisição de resultados correspondentes através de critérios de seleção. Em seguida, foi elaborada uma lista de palavras com seus sinônimos e as *strings* de busca foram construídos usando os termos “AND” e “OR” como conectores. Os termos iniciais foram definidos como “NdFeB” e “reciclagem”, enquanto os termos de pesquisa secundário foram “resíduos eletroeletrônicos” e “ímãs”. Assim, o mapeamento incluiria qualquer situação em que “NdFeB” e “reciclagem” estivessem relacionados aos “resíduos



eletroeletrônicos” e “ímãs”. Utilizou-se outras palavras relacionadas para garantir que nos resultados, fossem incluídos o maior número de estudos possível e os termos foram utilizados em inglês. Na tabela 2 apresentado a seguir, é possível observar as *strings* de busca selecionados.

Termos	Sinônimos
NdFeB	-
Recycling Waste	Recovering OR Reclaiming E-waste
Magnets	-

Tabela 2 – *Strings* de busca utilizadas como termos de pesquisa no mapeamento sistemático
Fonte: AUTOR, 2023.

Ao final, a *string* de busca ficou da seguinte maneira, utilizando os conectores para maior assertividade nos resultados: “*NdFeB AND (recycling OR recovering OR reclaiming) AND (waste OR E-waste) AND magnets*”. Selecionou-se uma base de dados considerada relevante na busca de artigos de pesquisa de forma mundial, nesse caso, a *Science Direct*.

A triagem através de critérios de inclusão e exclusão, foi aplicada para manter os resultados mais relevantes, eliminar estudos que não atendem às questões iniciais de busca e restringir o período de publicação dos estudos. Os critérios de seleção são destinados para identificação dos estudos primários que fornecem evidências diretas sobre as questões de pesquisa. A fim de reduzir a probabilidade de estudos não relacionados, os critérios de seleção devem ser decididos durante as etapas iniciais para classificação correta e confiável dos resultados. (KITCHENHAM, 2004). Os critérios de inclusão e exclusão usados nesse estudo, estão apresentados a seguir:

- a) Inclusão 1: estudos/artigos de pesquisa publicados em periódicos;
- b) Inclusão 2: o estudo deve ser um artigo completo;
- c) Inclusão 3: o estudo deve estar relacionado às áreas de Ciência Ambiental, Engenharia Química, Química, Ciência de Materiais e Engenharia;
- d) Inclusão 4: estudos publicados no período dos últimos 5 anos (2019-2023).

Os estudos que não estavam em conformidade com os quatro critérios de inclusão, foram eliminados e o restante dos estudos submetidos aos critérios de exclusão:

- a) Exclusão 1: estudo publicado antes de 2019;
- b) Exclusão 2: estudo publicado como tese/dissertação ou artigo de congresso/seminários;
- c) Exclusão 3: estudo não está relacionado com a recuperação de Nd.

Após a exclusão de estudos não pertinentes ao escopo deste trabalho, foi aplicado um filtro adicional referente ao título e palavras-chave: “Nd AND (recycling OR recovering OR reclaiming)”. A leitura posterior do resumo e do texto de forma completa, removeu outros estudos considerados como não relevantes ou que não estivessem relacionados ao estudo, mesmo após todo o processo de triagem. Todo o processo é



mostrado esquematicamente na Figura 1, desde o início da pesquisa geral até a exclusão de estudos em cada etapa.

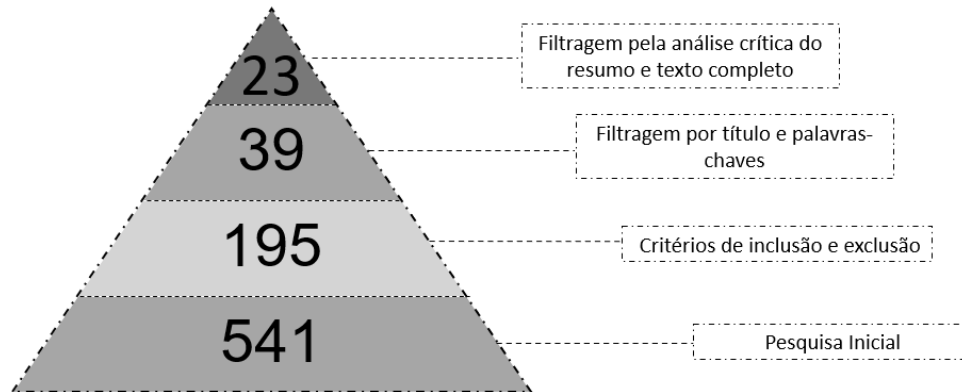


Figura 1 – Etapas de triagem dos artigos

Fonte: AUTOR, 2023.

Pode-se observar que o mapeamento começou com mais de 500 estudos que foram reduzidos a 23. Os resultados desse mapeamento sistemático estão apresentados de forma detalhada no item a seguir.

3. Resultados

O objetivo desta etapa é projetar os resultados obtidos através da extração de dados para registrar com precisão as informações coletadas. Após seleção dos estudos, esses foram identificados conforme tabela 3 a seguir.

Número	Autores	Número	Autores
[1]	Patil <i>et al.</i>	[13]	Önal; Riaño; Binnemans
[2]	Xue <i>et al.</i>	[14]	Liu <i>et al.</i>
[3]	Dudarko <i>et al.</i>	[15]	Liu <i>et al.</i>
[4]	Sun <i>et al.</i>	[16]	Zhihan <i>et al.</i>
[5]	Du <i>et al.</i>	[17]	Zhou <i>et al.</i>
[6]	Wu <i>et al.</i>	[18]	Niskanen; Lahtinen; Perämäki
[7]	Yang <i>et al.</i>	[19]	He <i>et al.</i>
[8]	Belfqueh <i>et al.</i>	[20]	Liu <i>et al.</i>
[9]	Kumari <i>et al.</i>	[21]	Reisdörfer <i>et al.</i>
[10]	Makarova <i>et al.</i>	[22]	Zhang <i>et al.</i>
[11]	Li <i>et al.</i>	[23]	Tanvar; Barnwal; Dhawan
[12]	Liu <i>et al.</i>		

Tabela 3 – Identificação dos artigos selecionados para o mapeamento sistemático

Fonte: AUTOR, 2023.

Os 23 estudos obtidos por meio do mapeamento sistemático foram encontrados para responder às perguntas iniciais da pesquisa. No entanto, nem todos os estudos conseguiram responder a todas as perguntas da pesquisa de forma simultânea.

3.1 Principais resultados – questão geral: Quais os métodos utilizados para recuperação de Nd de REEE?



Nos estudos encontrados, os seguintes métodos de recuperação de neodímio de REEE foram citados: processos de recuperação hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos e solvometalúrgicos. Esses métodos vem sendo estudados buscando alternativas eficientes na recuperação de ETR. Os métodos podem ser utilizados de forma isolada ou associada, dependendo do material que se busca obter ao final desses processos. (STALTER, 2022).

Para atendimento dessa primeira questão, os estudos foram classificados em relação aos processos primários para recuperação do Nd. Estudos com uma visão mais geral de recuperação, foram enquadrados na categoria “outros processos”. Os resultados obtidos estão apresentados na tabela 4.

Métodos	Número de estudos	% Total	Número da Referência
Processo hidrometalúrgico	18	78,3	[1], [2], [3], [4], [7], [8], [9], [10], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19], [21], [22], [23]
Processo pirometalúrgico	1	4,3	[20]
Processo solvometalúrgico	2	8,7	[6], [11]
Outros processos	2	8,7	[5], [12]

Tabela 4 – Métodos em desenvolvimento para a recuperação de Nd de REEE

Fonte: AUTOR, 2023.

Nos estudos apresentados, a metodologia mais utilizada, representando cerca de 78% dos estudos, foi realizada através do processo de recuperação hidrometalúrgico. Nesse processo ocorre a dissolução ou lixiviação dos elementos de interesse presentes nos REEE em ácidos ou bases e posterior recuperação por processos distintos. As ligas magnéticas podem ser dissolvidas em diferentes tipos de ácidos (tais como, ácido clorídrico, ácido sulfúrico e ácido nítrico) e os ETR são seletivamente precipitados como sulfatos, oxalatos ou fluoretos. (BINNEMANS *et al.*, 2013; MATOS, 2021; CONG *et al.*, 2023). De acordo com Cong *et al.* (2023), o ETR é então precipitado e transformado em sais, após processo de torrefação, obtém-se um único óxido de terra rara (OTR).

3.2 Principais resultados – questões específicas: Quais as metodologias de recuperação do Nd?

Os estudos foram classificados em relação às metodologias utilizadas para reciclar o Nd. Os estudos que aparecem repetidos, continham a utilização de mais de um método de recuperação. Na tabela 5 estão apresentados os estudos relacionados com as metodologias aplicada para recuperação de Nd.

Metodologia aplicada para extrações dos ETR	Número de estudos	Número da Referência
Lixiviação química utilizando como solvente ácidos	16	[1], [2], [3], [4], [7], [8], [9], [10], [15], [16], [17], [18], [19], [21], [22], [23]
Torrefação	6	[5], [6], [13], [14], [20], [21]
Lixiviação utilizando outros solventes	10	[5], [6], [11], [12], [14], [17], [18], [19], [22], [23]

Tabela 5 – Metodologias para recuperação de Neodímio

Fonte: AUTOR, 2023.



De uma maneira geral, a maioria dos estudos utilizou como metodologia para extração dos ETR, métodos de lixiviação, seja ela química ou com outros tipos de solventes. A extração utilizando solventes é um processo em que os metais de interesse são transferidos de uma solução original para uma solução secundária para posterior remoção dos metais de interesse. (ZHANG; ZHAO; SCHREIRER, 2016). Nesse mapeamento sistemático, encontraram-se estudos que utilizaram ácidos orgânicos ao invés de ácidos fortes (HCl, HNO₃ e H₂SO₄), tais como, ácido maleico, ácido cítrico e ácido acético. Após os processos de lixiviação e torrefação, os estudos de pesquisa apresentaram as etapas subsequentes, em que os metais de interesse foram precipitados para posterior separação através de metodologias de filtração, centrifugação, etc.

3.3 Principais resultados – questões específicas: É possível recuperar Nd de ímãs de REEE?

Para conseguir responder a questão específica se “É possível recuperar Nd de ímãs de REEE?”, os estudos foram classificados em relação ao composto de Nd recuperado e sua eficiência de recuperação com base no material recuperado, ou seja, quais elementos foram possíveis de separar dos REEE, conforme demonstrado na figura 2.

Eficiência de recuperação	Material recuperado	Número da referência	Eficiência de recuperação	Material recuperado	Número da referência
Acima de 95%	95% de ETR (Nd, Dy, Pr) + Al e Fe	[1]	99,4%	Hidróxido de ETR	[12]
Entre 95,6% e 99,1%	Nd	[2]	98,4%	Óxido misto de terras raras	[13]
Aproximadamente 97%	Nd ₃ e algumas impurezas	[3]	93,9% e 93,2% (*)	Fe e ETR (*)	[14]
99,81 %, 97,05 %, 95,51 %, 56,24 % e 0,20 % (*)	Pr, Nd, Gd, Ce e Fe (*)	[5]	98,3% e 94,6% (*)	ETR e Fe (*)	[15], [16]
96,5% e 64,3% (*)	ETR, CO de forma síncrona com Fe (*)	[6]	99% e 95% (*)	Fe e Nd (*)	[18]
Acima de 90%	Nd, Dy e Pr	[8]	99,5% e 97,2% (*)	Óxido misto de ETR e Fe (*)	[19]
99,9%	Óxidos mistos de Nd, Pr e Dy	[9]	99% de e 72,8% (*)	Nd (ácido málico) e Nd (ácido cítrico) (*)	[21]
ETR ≥99% foram removidos na primeira etapa, e 96% do Co e 99% do Fe foram removidos na segunda etapa		[11]			
		[4], [7],	96%	ETR com algumas impurezas (Fe, Al, Cu e Co)	[20]
Não informado		[10], [17], [23]	56% com mais de 98% de pureza.	Óxido misto de terras raras (Nd e Dy)	[23]

(*) respectivamente

Figura 2 – Metodologias para recuperação de Neodímio presente na composição de REEE
Fonte: AUTOR, 2023.

A problemática das metodologias para recuperação de Nd, está na composição do material recuperado, uma vez que há a presença de outros elementos residuais juntamente do elemento de interesse, o que pode interferir nas propriedades finais de determinada aplicação. Como visto, dependendo da metodologia utilizada, pode-se ter os seguintes constituintes misturados: Nd, Ferro (Fe), Cobre (Cu), Cobalto (Co), Gadolínio (Gd), Praseodímio (Pr), Disprósio (Dy), Alumínio (Al), entre outros.

Embora seja tecnicamente viável a reciclagem de REEE, existem desafios nesse processo. Isso se deve principalmente a baixa concentração dos ETR na composição desses produtos e ao custo elevado da recuperação. (PARAJULY *et al.*, 2019). A quantidade de ETR nessa mistura de diferentes materiais são muito baixas e, portanto, sua recuperação acaba exigindo uma série de inovações. (ZAKOTNIK; TUDOR, 2015).



Como os ETR têm propriedades químicas semelhantes, sua separação e purificação individual implica em processos caros, necessitando também, da utilização de reagentes químicos, gerando efluentes para tratamento. A variação dos teores dos constituintes dentro da composição dos ímãs ou presença de impurezas, também podem influenciar nessa separação, aumentando os custos desse processo. (TUNSU, 2018).

3.4 Principais resultados – questões estatísticas: Onde foram publicados os resultados?

A maior parte dos recursos de ETR, desde a produção, processamento e abastecimento, estão concentrados na região da Ásia, em que a China é o país que detém o domínio dessa indústria, produzindo mais de 90% dos requisitos atuais de terras raras. (DUSHYANTHA *et al.*, 2020). Das publicações estudadas, 13 são originárias da China (tabela 6), representando cerca de 56% dos estudos selecionados:

País	Número da referência	Quantidade de estudos
França	[8]	1
Ucrânia	[3]	1
Suíça	[1]	1
Brasil	[21]	1
Bélgica	[11], [13]	2
Índia	[9], [23]	2
Finlândia	[10], [18]	2
China	[2], [4], [5], [6], [7], [12], [14], [15], [16], [17], [19], [20], [22]	13

Tabela 6 – Local onde os estudos foram publicados
Fonte: AUTOR, 2023.

Em 2022, as reservas de ETR da China totalizaram cerca de 44 milhões de toneladas métricas de OTR, tornando o país líder mundial de produção. (GARSIDE, 2023). No Brasil, apesar de ser um dos países com as maiores reservas mundiais conhecidas de OTR, não há a exploração dos elementos, devido ao forte investimento requerido no desenvolvimento de rotas tecnológicas de extração e separação. A mineração exige rotas adequadas ao tipo de minério, sendo processos caros, de baixo rendimento e altamente poluentes. (TAKEHARA, 2015), obrigando o país a importar os OTR para usar como matéria-prima nas indústrias, principalmente da China. A China evoluiu nos últimos anos no que se refere à sua política de minerais, tornando-se a maior fornecedora de ETR por meio da industrialização e produção de bens manufaturados. (PEITER *et al.*, 2020). Todas essas questões justificam o elevado número de pesquisas realizados na Ásia, principalmente na China, dentre os estudos desenvolvidos .

3.5 Principais resultados – questões estatísticas: Quantos artigos foram publicados por ano?

Para detalhar o número de publicações por ano, a tabela 7 apresentada a seguir, o número de estudos publicados dentro do período de 2019 a 2023. Percebe-se uma tendência crescente no número de publicações por ano.



Ano	Número da referência
2019	[12], [17], [21], [23]
2020	[7], [10], [13], [14]
2021	[9], [11], [19], [20]
2022	[2], [3], [4], [15], [18]
2023	[1], [5], [6], [8], [16], [22]

Tabela 7 – Publicações por ano
Fonte: AUTOR, 2023.

O gráfico apresentado na figura 3 a seguir, mostra uma tendência crescente no número de publicações por ano. Previsões indicam que no mundo, a demanda anual por neodímio excederá a produção até 2030. (CASTILLOUX, 2019).

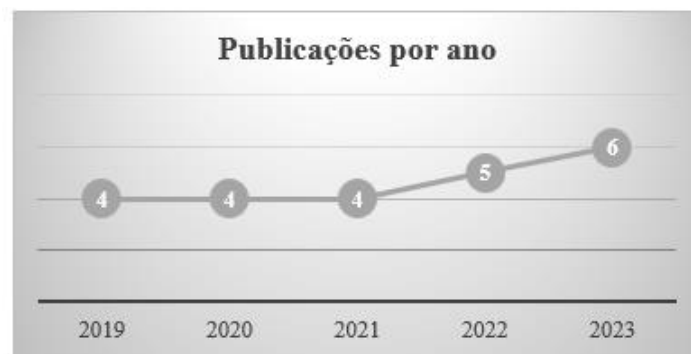


Figura 3 – Quantidade de estudos
Fonte: AUTOR, 2023.

A China planeja acelerar o desenvolvimento de tecnologias limpas, principalmente a eletrificação automotiva para superar a escassez de petróleo e as preocupações ambientais. Esse desenvolvimento se baseia fortemente na utilização de ETR, uma vez que em suas aplicações principais estão as energias limpas. Sendo assim, na próxima década, a demanda por ETR, principalmente Nd, Dy, La, Pr e Ce será crescente. (LI *et al.*, 2019). Essas questões desencadearam uma preocupação global relacionada a cadeia de suprimento de ETR uma vez que pode haver escassez de matérias-primas. (DUSHYANTHA *et al.*, 2020).

Sendo assim, nos últimos anos, o aumento de estudos sobre reciclagem de Nd reflete a importância do tema e o investimento no desenvolvimento de novas técnicas ambientalmente e economicamente viáveis para recuperação de matérias-primas críticas como é o caso do ETR Nd.

5. Considerações Finais

A recuperação de ímãs de NdFeB é uma opção ambientalmente viável para reaproveitamento de matérias-primas críticas, uma vez que esses materiais com alto valor agregado deixariam de ser descartados, muitas vezes de maneira incorreta, podendo ser inclusive, prejudicial ao meio ambiente e a saúde dos seres vivos, uma vez que na composição desses materiais existem elementos classificados como sendo tóxicos.



As diferenças entre a reciclagem através dos processos hidrometalúrgico e pirometalúrgico são pequenas devido às perdas de material da recuperação de valor. A problemática da recuperação de Nd através desses processos, está na composição do material recuperado, uma vez que há a presença de outros elementos residuais juntamente do elemento de interesse. Sendo assim, a avaliação da viabilidade de reinserção do Nd residual em um novo processo produtivo deve ser avaliada, pois o neodímio recuperado está misturado com outros elementos. Como os ETR têm propriedades químicas semelhantes, sua separação e purificação individual implica em processos caros, que inclui várias etapas de separação para alcançar alta pureza do produto reciclado. A variação dos teores dos constituintes dentro da composição dos ímãs ou presença de impurezas, também podem influenciar, aumentando os custos desse processo. Nesses processos há a utilização de reagentes químicos o que gera efluentes para tratamento.

Entretanto, a reciclagem de ímãs de NdFeB é atraente para recuperação de ETR, já que a necessidade de material virgem dentro de um processo produtivo poderia ser reduzida. Esta é uma das principais vantagens: redução do impacto ambiental para produzir novos ímãs a partir de matéria-prima virgem diretamente extraída e recuperação de matéria-prima de alto valor agregado que seria descartada nos REEE.

Através desse mapeamento sistemático, foi possível perceber que a reciclagem de Nd residual para uso como matéria-prima em novos processos produtivos de ímãs de NdFeB, é uma área de pesquisa que está em desenvolvimento e mostra que a palavra-chave “recuperação” é a que mais aparece. Isto demonstra a necessidade de beneficiamento do material pós-consumo para seu retorno à cadeia produtiva. Há uma tendência crescente de pesquisas, provável que novas metodologias devam surgir no futuro, aumentando o número de publicações nessa área. Para próximos estudos, sugere-se a utilização de diferentes *strings* de busca para aumentar a possibilidade de acertos e reduzir a exclusão de estudos relevantes relacionados com o assunto de interesse.

Agradecimentos

As autoras e autor agradecem a FINEP e CNPq pelo apoio financeiro aos projetos de pesquisa, e ao CNPq pelas bolsas de PQ2 e DT2 de autores.

Referências

- [1] PATIL, A. B., THALMANN, N., TORRENT, L., TARIK, M., STRUIS, R. P.W.J., LUDWIG, C. Surfactant-based enrichment of rare earth elements from NdFeB magnet e-waste: Optimisation of cloud formation and rare earths extraction, *Journal of Molecular Liquids*, Volume 382, 2023.
- [2] XUE W., LIU R., LIU X., WANG, Y., LV P., YANG, Y. Selective extraction of Nd (III) by novel carboxylic acid based ionic liquids without diluent from waste NdFeB magnets, *Journal of Molecular Liquids*, Volume 364, 2022.
- [3] DUDARKO, O., KOBYLINSKA, N., KESSLER, V., SEISENBAEVA, G. Recovery of rare earth elements from NdFeB magnet by mono- and bifunctional mesoporous silica: Waste recycling strategies and perspectives, *Hydrometallurgy*, Volume 210, 2022.



- [4] SUN, H., WANG, T., LI, C., YANG, Y. Recycling rare earth from ultrafine NdFeB waste by capturing fluorine ions in wastewater and preparing them into nano-scale neodymium oxyfluoride, *Journal of Rare Earths*, Volume 40, Pages 815-821, 2022.
- [5] DU, C., MA, S., XIE, M., YANG, F., ZHAO, Z., CHEN, Y., MA, Y. Recovery of high-value rare earth elements from waste NdFeB by the water-soluble ammonium salt [Hbet]Cl, *Separation and Purification Technology*, Volume 308, 2023.
- [6] WU, J., WANG, D., YE, C., WANG, Z., HU, X. Selective extraction and separation of REEs from NdFeB magnets scrap using co-chlorination and water leaching, *Separation and Purification Technology*, Volume 306, Part A, 2023.
- [7] YANG, Y., LAN, C., WANG, Y., ZHAO, Z., LI, B. Recycling of ultrafine NdFeB waste by the selective precipitation of rare earth and the electrodeposition of iron in hydrofluoric acid, *Separation and Purification Technology*, Volume 230, 2020.
- [8] BELFQUEH, S., SERON, A., CHAPRON, S., ARRACHART, G., MENAD, N. Evaluating organic acids as alternative leaching reagents for rare earth elements recovery from NdFeB magnets, *Journal of Rare Earths*, Volume 41, Pages 621-631, Issue 4, 2023.
- [9] Kumari A., Dipali, Randhawa N. S., Sushanta K. Sahu. Electrochemical treatment of spent NdFeB magnet in organic acid for recovery of rare earths and other metal values, *Journal of Cleaner Production*, Volume 309, 2021.
- [10] MAKAROVA, I., RYL, J., SUN, Z., KURILO, I., GÓRNICKA, K., LAATIKAINEN, M., REPO, E. One-step recovery of REE oxalates in electro-leaching of spent NdFeB magnets, *Separation and Purification Technology*, Volume 251, 2020.
- [11] LI, X., LI, Z., BINNEMANS, K. Closed-loop process for recovery of metals from NdFeB magnets using a trichloride ionic liquid, *Separation and Purification Technology*, Volume 275, 2021.
- [12] LIU, B., ZHU, N., LI, Y., WU, P., DANG, Z., KE, Y. Efficient recovery of rare earth elements from discarded NdFeB magnets, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 124, 2019.
- [13] ÖNAL, M. A. R., RIAÑO, S., BINNEMANS, K. Alkali baking and solvometallurgical leaching of NdFeB magnets, *Hydrometallurgy*, Volume 191, 2020.
- [14] LIU, Q., TU, T., GUO, H., CHENG, H., WANG, X. High-efficiency simultaneous extraction of rare earth elements and iron from NdFeB waste by oxalic acid leaching, *Journal of Rare Earths*, Volume 39, Pages 323-330, Issue 3, 2020.
- [15] LIU, Z., ZHOU, H., LI, W., LUO, X., WANG, J., LIU, F. Separation and coextraction of REEs and Fe from NdFeB sludge by co-leaching and stepwise precipitation, *Separation and Purification Technology*, Volume 282, Part B, 2022.
- [16] ZHIHAN, Z., ZHI, W., DONG, W., YONG, L., WANHAI, X., CHENGHAO, L., YANG, L., JIAN, W., GUOBIAO, Li. A green process for selective REEs recovery from Rare earth waste through mechanochemical activation, *Separation and Purification Technology*, Volume 315, 2023.
- [17] ZHOU X., TIAN Y.L., YU H.Y., ZHANG H., ZHONG X.C., LIU Z.W. Synthesis of hard magnetic NdFeB composite particles by recycling the waste using microwave assisted auto-combustion and reduction method, *Waste Management*, Volume 87, Pages 645-651, 2019.



- [18] NISKANEN, J., LAHTINEN, M., PERÄMÄKI, S. Acetic acid leaching of neodymium magnets and iron separation by simple oxidative precipitation, *Cleaner Engineering and Technology*, Volume 10, 2022.
- [19] HE, L., XU, Q., LI, W., DONG, Q., SUN, W. One-step separation and recovery of rare earth and iron from NdFeB slurry via phosphoric acid leaching, *Journal of Rare Earths*, Volume 40, Issue 2, Pages 338-344, 2022.
- [20] LIU, F., CHEN, F., WANG, L., MA, S., WAN, X., WANG, J. Selective separation of rare earths from spent Nd-Fe-B magnets using two-stage ammonium sulfate roasting followed by water leaching, *Hydrometallurgy*, Volume 203, 2021.
- [21] REISDÖRFER, G., BERTUOL, D., TANABE, E. H. Recovery of neodymium from the magnets of hard disk drives using organic acids, *Minerals Engineering*, Volume 143, 2019.
- [22] ZHANG, Z., LIU, J., LI, T., FU, Z., MAO, J., LI, X. REN, S. Highly efficient and selective separation of dysprosium and neodymium from polyethylene glycol 200 solution by non-aqueous solvent extraction with P350, *Journal of Molecular Liquids*, Volume 380, 2023.
- [23] TANVAR, H., BARNWAL, A., DHAWAN, N. Characterization and evaluation of discarded hard disc drives for recovery of copper and rare earth values, *Journal of Cleaner Production*, Volume 249, 2020.
- ADIBI, N., LAFHAJ, Z., PAYET, J. New resource assessment characterization factors for rare earth elements: applied in NdFeB permanent magnet case study. *Int J Life Cycle Assess* 24, 712– 724. 2019.
- BALDÉ, C. P., FORTI, V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. The global E-waste monitor. United Nations University (UNU), International Telecommunication (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. 2017.
- BINNEMANS, K. et al. Recycling of rare earths: a critical review, *Journal of Cleaner Production*. V. 51, p. 1-22, 2013.
- BLANCO, J., LINS, F., GIESE, E. C. XAVIER, L. *Mineração Urbana e Cooperativismo: Uma Abordagem sobre a Reciclagem de Resíduos de Eletroeletrônicos*. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021. 27p.
- CASTILLOUX, R. ([s.d.]). *Adamasintel.com* Disponível em: <<http://www.adamasintel.com/wp-content/uploads/2019/07/Adamas-Intelligence-Rare-Earths-Market-Issues-and-Outlook-Q2-2019.pdf>> Acesso em: 8 de junho de 2023.
- CARDOSO, M. M. PAZ, G. A. S. BRITO, N. G. C. PINTO, M. V. AGUIAR JÚNIOR, E. A. *Abordagem sobre Reciclagem de Elementos Terras Raras em Sucata Eletrônica*. XIII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. 2016.
- CIACCI, L., VASSURA, I., CAO, Z., LIU, G., PASSARINI, F. Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*. Volume 142. 2019.
- CONG, L., YU, L., ZHOU, Q., LU Q., YUE, M. Short-process recycling of NdFeB sintered magnet sludge wastes: Challenges and approaches. *Journal of Rare Earths*, 2023.
- DUSHYANTHA, N., BATAPOLA, N., ILANKOON, I. M. S. K., ROHITHA, S., PREMASIRI, R., ABEYSINGHE, B., DISSANAYAKE, K. The story of rare earth



elements (REEs): occurrences, global distribution, genesis, geology, mineralogy and global production. *Ore Geology Reviews*. 2020.

GARSDALE, M. Rare earth reserves worldwide 2022, by country. Statista - The Statistics Portal for Market Data, Market Research and Market Studies. Disponível em: <<https://www.statista.com/statistics/277268/rare-earth-reserves-by-country>>

GIESE, E.; BLANCO, J.; LINS, F. XAVIER, L. Mineração urbana e cooperativismo: uma abordagem sobre a reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021.

KAYA, E.E., KAYA, O., STOPIC, S., GÜRMENT, S., FRIEDRICH, B. NdFeB Magnets Recycling Process: Na Alternative Method to Produce Mixed Rare Earth Oxide from Scrap NdFeB Magnets. *Metals* 2021, 11, 716.

KITCHENHAM, B. Procedures for Performing Systematic Reviews, Joint Technical Report Software Engineering Group, Department of Computer Science Keele University, United King and Empirical Software Engineering. Austrália. 2004.

LI Z., DIAZ, L. A., YANG Z., JIN H., LISTER, T. E., VAHIDI E., ZHAO F. Comparative life cycle analysis for value recovery of precious metals and rare earth elements from electronic waste, *Resources, Conservation and Recycling*. Pages 20-30, Volume 149, 2019.

PARAJULY, K., KUEHR, R., AWASTHI, A. K., FITZPATRICK, C., LEPAWSKY, J., SMITH E., WIDMER, R., ZENG, X. Future E-waste Scenarios; (2019). StEP (Bonn), UNU ViE-SCYCLE (Bonn) & UNEP IETC (Osaka).

STALTER, C. F. Análise comparativa da utilização de ácido orgânico versus ácido inorgânico na recuperação de neodímio presente em hard disk drives (HDs): uma abordagem técnica, ambiental e econômica. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós- graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). São Leopoldo, 2022.

TAKEHARA, Lucy. Avaliação do potencial de Terras Raras no Brasil. 218 p. Brasília: CPRM, 2015.

TRIPATHY, P. K., MONDAL, K., KHANOLKAR, A. R. One-step manufacturing process for neodymium-iron (magnet-grade) master alloy. *Materials Science for Energy Technologies*, 4, 249–255. 2021.

TUNSU, C. Hydrometallurgy in the recycling of spent NdFeB permanent magnets, In *Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, Waste Electrical and Electronic Equipment Recycling*, Woodhead Publishing, Pages 175-211, 2018.

ZAKOTNIK, M., TUDOR, C.O. Commercial-scale recycling of NdFeB-type magnets with grain boundary modification yields products with ‘designer properties’ that exceed those of starting materials, *Waste Management*, Volume 44, 2015, Pages 48-54.

ZHANG, J., ZHAO, B. SCHREINER, B. Separation Hydrometallurgy os Rare Earth Elements. Springer, 2016.



EXTRACTION OF GOLD BY INTENSIVE CYANIDATION AND BIO-EXTRACTION OF BASE METALS FROM ELECTRONIC SCRAP - A SEMIPILOT SCALE EXPERIENCE

SOBRAL, L. G. S¹., DE OLIVEIRA, A. D. N.¹, DE MIRANDA, A. G. T.¹ N BELLO¹
, A.L.C, CUNHA², C.R. WISNIEWSKI³

¹Centre for Mineral Technology Mineral (CETEM), Coordination of Metallurgical and Environmental Processes. ²Federal University of Rio de Janeiro, School of Chemistry. ³CEO of Euro Metal Brasil Mining Company Limited. E-mails for contact: sobralui@gmail.com, andriela.norberto7@gmail.com

Abstract

The accelerated growth of new technologies and considering the ever-increasing consumption of new electronic devices entails discarding jumbled up electronic scraps. Electronic waste, nowadays, can reach a significant number of different elements, with different physical-chemical characteristics, ranging from base metals, precious metals, rare earth elements and recalcitrant elements. In this study, we used the intensive cyanidation for recovering precious metals, contained specifically on printed circuit boards. Base metals, on the other hand, more specifically copper and nickel, major elements in these plates, were extracted using a biotechnological approach, on a semi-pilot scale. The bacteria *Acidithiobacillus ferrooxidans*-LR and *Leptospirillum ferrooxidans*-ATCC53992 were used whose function, in this process, was to oxidize ferrous ions, added to the leaching medium, to ferric ions in a reaction cycle, as the ferric ions act as an oxidizing agent and are reduced to ferrous ions after the oxidation of metals contained in electronic scrap.

Keywords: Cyanidation, Bio-extraction, base metals, electronic scraps.

1. Introduction

Recently, the emergence of new technologies has led to a growing variety of new electronic devices, with a consequent increase in their consumption, shortening their



useful lives and generating large amounts of electronic waste, known as waste of electrical and electronic equipment (i.e., WEEE).

However, the generation of this type of waste, associated with the stimulus exacerbated by the consumption, reveals a problem that is configured in an increase in the generation of this type of residues. Due to cultural factors, consumers have preferred to discard rather than repair malfunctioning or damaged equipment. At the same time the constants launches of new technologies and modernization of old equipment also contribute to maintain this phenomenon (PUCKETT & SMITH, 2002). Due to the forecast of electronic equipment becomes obsolete, either by shortening its useful life or due to failure events and problems in their operation are classified as waste. Those wastes carries a high number of metallic elements from non-renewable primary sources (i.e., ores, oil etc.) that eventually need to be recovered for producing new electronic devices making use of new technologies for the sustainable use of these mineral assets.

These electronic wastes originate from the disposal of electrical and electronic devices in disused, such as cell phones, computers etc., which contain memory cards, printed circuit boards, batteries, LCD etc. in their structures, as well as various elements and chemical substances (BHUTTA, OMAR, YANG, 2011 apud JIANZHI et al., 2004; YAMANE et al., 2012) (GUO et al., 2009; VEIT et al., 2006). Such electronic waste contains in its structures primarily polymeric and metallic materials. The well-known e-waste (electronic waste) covers the following equipment: radios, televisions, computers and their peripherals, cell phones etc.

This waste is composed mainly of plastic, iron, non-ferrous metals, glass and wood. According to Oliveira and Sobral (2012), modern electronic devices can include a large amount of elements, among them are plastics, precious metals (Ag, Au, Pd e Pt), ferrous metals (V, Cr, Fe, Mn, Ni, Nb, Mo), non-ferrous metals (Mg, Al, Ti, Co, Cu, Zn, Sn, Pb), and metals for special applications (Li, Be, B, Ga, As, Se, Sr, Y, Zr, Cd, In, Sb, Te, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Re, Hg, Tl, Bi).

The final destination of electronic waste is landfill or incineration; however, when the electronic waste is disposed of incorrectly, affects a series of environmental problems,



since that can be naturally leached, producing leachate, resulting in pollution of groundwater and water bodies. In addition, when these residues are burned toxic gases are emanated (i.e., dioxins and furans) as a result of chemical reactions, due to the presence of flame retardants (GUO et al., 2010; JIE et al., 2008; KANG, SCHOENUNG, 2005). Conventional recycling processes involve hydrometallurgical and pyrometallurgical routes; however, bioleaching presents itself as an alternative route for extracting base metals (CHOI et al., 2004) and precious metals from electronic scraps (BRANDL & FARAMARZI, 2006). In this way, several techniques used for processing electronic scraps were developed reducing their characteristic volume. Figure 1 below gives a quick idea on how the electronic equipment is generated, consumed and later recycled to recover the metallic content.

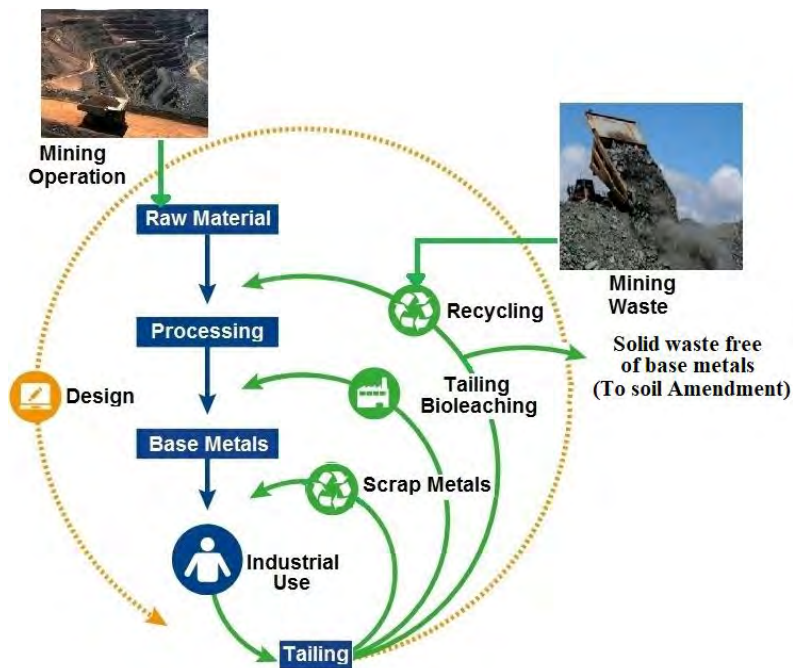


Figure 1: Production of electrical and electronic devices from different natural resources, its post-consumer discharge and recycling from the perspective of the circular economy. (Source: the authors)



This Figure shows the combination of raw materials from different industrial sectors (i.e., mining, petroleum industry etc.) in the manufacture of consumables. Once produced, these goods reach obsolescence in a short period of time and are improperly discarded. However, we are dealing with goods that carry metallic elements in their constitution from non-renewable natural resources. In the circular economy, these obsolete devices can be repaired during maintenance or can be remanufactured, which means, the undamaged electronic components can be reused and, finally, the metallic parts can be recycled, duly extracted in their soluble forms for subsequent separation and obtaining pure metals.

The hydrometallurgical processes, used in the extraction of precious metals, make use of specific reagents, such as cyanide, aqua regia, thiourea, halides, among others (CUI & ZHANG, 2008). Among the hydrometallurgical processes, cyanidation is traditionally used in the extraction of precious metals due to its effectiveness as a complexing agent in conjunction with oxygen, which acts as an oxidizing agent. The cyanide is used in the form of salts, such as sodium cyanide (NaCN), potassium (KCN) and calcium cyanide, (Ca(CN)₂), the first two being the most soluble in water. According to Guzman (1999), cyanidation is carried out effectively, considering the appropriate use of different process variables, such as cyanide and dissolved oxygen concentration, pH, temperature and stirring speed. However, adjusting the pH to a value between 10 and 11, is essential for cyanide ions (CN⁻), when dissolving sodium cyanide in water, do not undergo hydrolysis, with formation of hydrocyanic acid (i.e., HCN), as shown in Reaction 3, toxic gas, thus preserving these cyanide ions, in their free form, in solution (CIMINELI, 2009).



On the other hand, the bioleaching process is a promising alternative, as it does not require high energy consumption and low cost of implementation and operation. In the metals bio-extraction process, microorganisms are responsible for generating the oxidant agent in the reaction system (i.e., Fe³⁺ ions) from the oxidation of ferrous ions (i.e., Fe²⁺) that can be added to the system either in soluble (FeSO₄.7H₂O) or insoluble (FeS₂ - pyrite) species. Brandl et al. (2001), demonstrated, in studies in which



mesophilic and thermophilic acidophilic microorganisms, more specifically *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* etc. (BRIERLEY, 2010; RODRIGUES, 2015; TAO & DONGWEI, 2014; WATLING, 2006) that metals can be recovered from printed circuit boards through microbial leaching. The method of dissolving metals contained in electronic scraps is similar to the mechanism of dissolving sulphide minerals, such as copper oxidation (Equation 2) in which the Fe^{3+} , released into the system from the oxidizing action of bacteria, oxidizes metallic copper to Cu^{2+} . The role of microorganisms, in this case, is to re-oxidize the produced Fe^{2+} to Fe^{3+} establishing, thus, a reaction cycle.



2. Experimental

Initially, parts of the scrap from printed circuit boards were physically collected, visibly rich in precious metals. For the precious metals extraction process, a sample of the selected material was placed in an acrylic column and submitted to an ascending flow of aerated cyanide solution, in different concentrations of free cyanide (i.e., this concentration may vary depending on the mass of scrap to be treated, normally ranging from 3 to 10 $g.L^{-1}$), from a glass reactor, with useful volume of 1 litre (Figure 2 - reaction system used in the cyanidation tests, as well as samples of original scrap and after cyanidation of precious metals on bench scale).

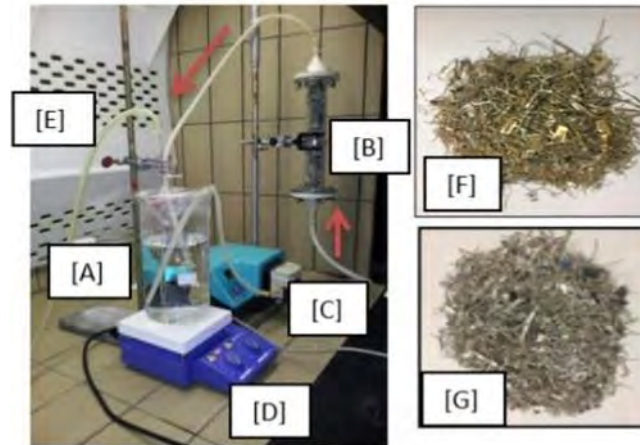


Figure 2: Reaction system consisting of: [A] Pyrex glass reactor, [B] Acrylic column loaded with electronic scrap, [C] peristaltic pump, [D] magnetic stirrer, [E] piping for air injection and, additionally, [F] and [G] scrap samples before and after carrying out the cyanidation tests, respectively

After finishing the cyanidation process, the parts free of precious metals, now apparently exposing the base metals, were washed to remove any remaining cyanide leachate. With the recirculation of the leaching solution, the layer of precious metals, yellowish in colour, disappears in, approximately, 10 minutes indicating their total removal. A representative sample of the remaining solid phase was digested in aqua regia and the resulting leachate was analysed for the metallic constituents by Atomic Absorption Spectrometry, whose results were: Cu 64.9%, Zn 27.0%, Sn 1.8%, Al 1.4%, Ni 1.3%, Fe 1.2%, Si 1.1%, Pb 0.56%, Ba 0.34%, Ti 0.12% and W 0.11%.

Base metal bio-extraction experiments were carried out in our semi-pilot unit, shown in Figure 3, with a capacity of 20 litres of solution, containing a perforated polypropylene hexagonal drum (i.e., holes of $d < 1\text{mm}$) for better mass transport between the leachate and the metallic substrate, where a 100g sample of scraps were introduced. The volume of 13 litres of leaching solution consisted of MKM culture medium (i.e., Modified Kelly Medium - $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$: 0.08 g.L^{-1} ; $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$: 0.08 g.L^{-1} ; K_2HPO_4 : 0.008 g.L^{-1}), together with a solution containing 33.3 g.L^{-1} of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, pH at 1.8, adjusted with a 5M sulphuric acid solution, with the solution temperature controlled at 30°C , plus



750ml of culture of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and 750ml of *Leptospirillum ferrooxidans* culture at a concentration of 10^7 cells/mL of each culture.

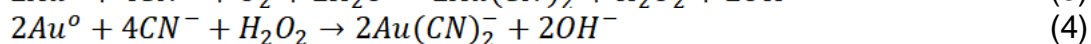
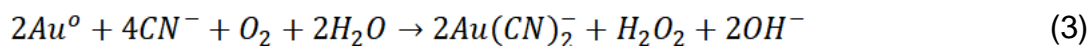


Figure 3: Reaction system used in the bio-extraction of base metals from electronic scraps.

3. Results and Discussion

3.1 Intensive Cyanidation

The reactions as shown in equations 3 and 4, below, show how the precious metals dissolution process take place, gold in particular, by the joint action of cyanide, complexing agent, and oxygen, oxidizing agent.



As can be seen, analysing the reactions 3 and 4 above, the first stage of the dissolution process of gold begins with the generation of peroxide as an reaction intermediate. With the continuity of cyanidation, this peroxide, together with free cyanide, are in charge of continuing such dissolution process. These same reactions also occur when dissolving the other precious metals. Figure 4 shows the influence of increasing cyanide concentration on the gold dissolution process in 2 hours cyanidation tests. It should be noted that the determination of the percentage of gold extraction was carried out taking into account the mass of metal solubilized throughout the experiment (determined by



ICP-OES) and the content of each of the metals contained in the electronic scrap used in this study.

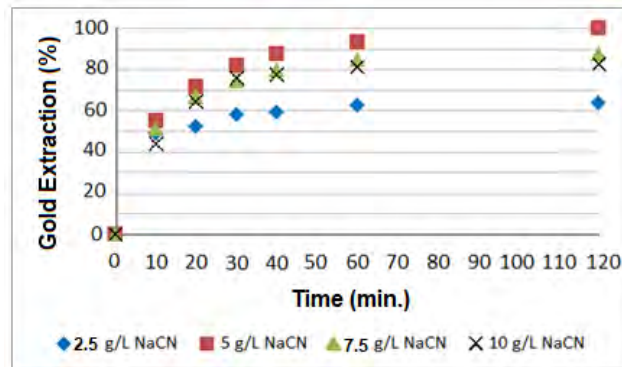


Figure 4: Gold extraction during the cyanidation test for different cyanide concentrations using only air.

As can be seen in Figure 4, there is intensification in the extraction of gold as the initial cyanide concentration is increased. However, with the continued increase of this concentration, the extractive process significantly decreases its effectiveness since there is a decrease in the solubility of oxygen, the oxidizing agent, due to the increase of the salinity (i.e., ionic strength) of the medium. Thus, it became clear that it is not advantageous to exceed the initial concentration of 5g.L^{-1} in cyanide since the benefit achieved at higher concentrations, in terms of gold extraction, does not compensate for the expenses with this increase in concentration.

3.2 Bio-extraction of Base Metals

With regard to the bio-extraction of base metals, from the solid material remaining after cyanidation of precious metals, what can be observed is that the action of ferric ions is effective in the dissolution of these metals, via an indirect mechanism, that is, they are generated by the bio-oxidation of ferrous ions added to the culture medium. The graph of Figure 5 highlights the evolution of the copper and nickel bio-extraction processes, the most abundant metals in the sample under study. This type of tendency can be corroborated by observing the potential values of the reactions of ferric ions with these metals, also shown in Figure 5, which are positive values, a fact that demonstrates the spontaneity of the dissolution reactions of the referred metals.

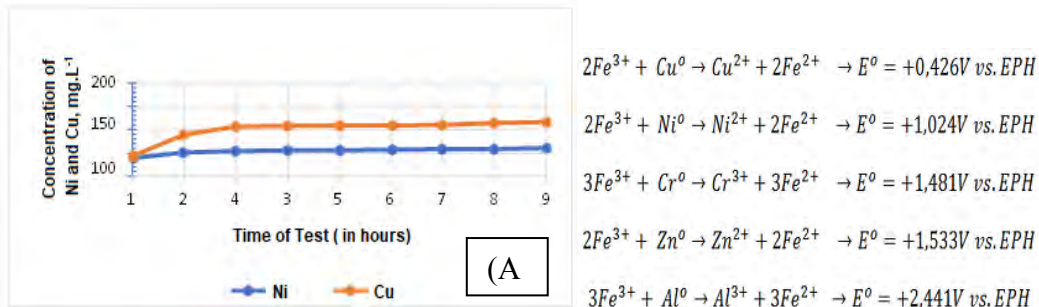


Figure 5: [A] Bio-extraction of Ni and Cu from electronic scrap, [B] Values of potential for dissolution reactions of base metals by ferric ions.

What can be observed in the graph (Figure 5) is that there is a very expressive extraction in the first four hours of the process, followed by its stagnation, possibly due to the impact of the ionic strength on the metabolism of the microorganisms used, due to the fact that these microorganisms have not previously been adapted to the increasing concentrations of these metals.

4. Conclusion

During the intensive cyanidation of the gold contained in the electronic scrap sample, it was observed that the increase in the cyanide concentration was effective until the solubility of dissolved oxygen, the oxidizing agent, was compromised, which occurred after the addition of amounts higher than $5g.L^{-1}$.

The bio-extraction of base metals by ferric ions, generated from the oxidation of ferrous ions, mediated by the microorganisms used, proved to be quite spontaneous and will certainly occur in its entirety with the continuity of this bio-extractive process.

5. References

- BHUTTA M, KHURRUM S, OMAR A, YANG X. Electronic Waste: A Growing Concern in Today's Environment. Economics Research International, p.5, 2011.
- BRANDL H, FARAMARZI M, Microbe-metal-interaction for the biotechnological treatment of metal-containing solid waste. China Particuology, v. 4, p.93-97, 2006.
- BRIERLEY, CL. Biohydrometallurgical prospects. Hydrometallurgy, v.104, p.324-8., 2010.



CHOI M, et al., Microbial recovery of copper from printed circuit boards of waste computer by *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, v. 39, p. 2973-2982, 2004.

CIMINELLI T D, *Princípios da cianetação*, 2002.

CUI J, ZHANG L, Metallurgical Recovery of Metals from Electronic Waste: A review. *Journal of Hazardous Materials*, v. 158, p. 228–256, 2008.

GUO J, GUO J, XU Z, Recycling of non-metallic fractions from waste printed boards: a review. *Journal of Hazardous Materials*, v.168, n.2-3, p.567-590, 2009.

GUO Q et al., Pyrolysis of scrap printed circuit board plastic particles in a fluidized bed. *Powder Technology*, vol 198, p.422-428, 2010.

JIE G, YING-SHUN L, MAI-XI L, Product characterization of waste printed circuit board by pyrolysis. *Journal of analytical and applied Pyrolysis*, vol. 83, p.185-189, 2008.

KANG H, SHOENUNG J., Electronic waste recycling: A review of U. S. infrastructure and technology options. *Resources Conservation & Recycling*, v. 45, p.368-400, 2005.

OLIVEIRA D, SOBRAL L, *Mineração Urbana. A Saída para a Reciclagem de Valores Metálicos de Fontes Não-renováveis*. Centro de Tecnologia Mineral, 2012.

PUCKETT J, et al., Exporting harm, the high-tech trashing of Asia. The Basel Action Network (BAN) and Silicon Valley Toxics Coalition (SVTC), p. 1-54, 2002.

TAO, H; DONGWEI, L. Presentation on Mechanisms and Applications of Chalcopyrite and Pyrite Bioleaching in biohydrometallurgy-A Presentation. *Biotechnology Reports*, 2014.

RODRIGUES M, *Biolixiviação de cobre com micro-organismos mesófilos e termófilos moderados: sulfetos secundários contendo flúor e placas de circuito impresso*, 2015.

VEIT H, et al., Recovery of Copper from Printed Circuit Boards Scraps by Mechanical Processing and Electrometallurgy. *Journal of Hazardous Materials*, v. B137, p.1704-1709, 2006.

YAMANE L, *Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico*. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2012.

WATLING H, The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides – A review. *Hydrometallurgy*, v. 84, p 81-108, 2006



GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NA REDE FEDERAL DE ENSINO: ESTUDO DE CASO NO CEFET/RJ

Aline Guimarães Monteiro Trigo^{1*}; José Aires Trigo²; Thiago Santos Ramalho³; Úrsula Maruyama⁴

¹ CEFET/RJ; ² UNESA; ³ CEFET/RJ; ⁴ CEFET/RJ

*aline.monteiro.trigo@gmail.com

Resumo

O consumismo da sociedade atual se reflete no padrão de aquisição dos produtos tecnológicos. Como consequência, a geração mundial de resíduo eletroeletrônico tem crescido em níveis alarmantes, o que vem gerando discussões acerca do tema em várias esferas da sociedade. O ambiente de uma instituição de ensino não é diferente dos demais espaços urbanos, pois suas atividades resultam também na produção de resíduos sólidos, em especial resíduos eletroeletrônicos. Nesse sentido, o objetivo do presente trabalho é analisar a conformidade das ações de gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos em uma instituição de ensino, que participa do sistema de logística reversa, atendendo às normas legais. Metodologicamente, o estudo caracteriza-se como uma pesquisa qualitativa aplicada. A base do trabalho foi pautada na pesquisa documental, com foco em um estudo de caso, especificamente no Cefet/RJ. Os resultados apresentados foram alcançados ao comparar as informações dos documentos institucionais pertinentes, com os ditames da legislação brasileira. Algumas limitações no processo de gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos foram identificadas. Entretanto, constatou-se um esforço concentrado empreendido pelo Cefet/RJ no desenvolvimento de práticas e projetos institucionais sustentáveis para viabilizar a logística reversa e o desfazimento adequado dos seus resíduos.

Palavras-chave: Gerenciamento de resíduos; Lâmpadas Fluorescentes; Resíduos Eletroeletrônicos; Critérios de sustentabilidade.

1. Introdução

Com a mudança de paradigma, de uma sociedade industrial para uma sociedade com acesso democratizado à informação e ao conhecimento, as discussões sobre os impactos gerados pelos resíduos sólidos eliminados pelos seus usuários, se tornaram mais comuns. O atual padrão de consumo vem levando à intensificação do descarte dos resíduos eletroeletrônicos no meio ambiente, já que em pouco tempo esses materiais passam de inovação a equipamento obsoleto, e tão logo, sucata tecnológica. De modo geral, os equipamentos eletroeletrônicos têm em sua composição diferentes substâncias. Algumas delas apresentam possibilidades de gerar lucro com a sua recuperação, como prata, platina e ouro, enquanto outras, se descartadas de forma inadequada, podem gerar custos financeiros, ambientais e à saúde humana (PEREIRA, DE OLIVEIRA, 2019).



Logo, são muitos os motivos a serem considerados para o gerenciamento adequado dessa tipologia de resíduos.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), produtos eletroeletrônicos e lâmpadas devem apresentar requisitos de responsabilidade pós-consumo, onde a responsabilidade deve ser compartilhada entre o emissor do resíduo e o produtor do material (BRASIL, 2010). A logística reversa colabora para a minimização de impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado desses resíduos e envolve aspectos de recuperação e reciclagem (SANTOS, 2012).

O ambiente de uma instituição de ensino não é diferente dos demais espaços urbanos, pois suas atividades resultam também na produção de resíduos sólidos, em especial resíduos eletroeletrônicos. A incorporação da sustentabilidade no espaço escolar não deve ser adotada apenas pela exigência da legislação, ou pelo modismo, pois, deve estar pautada na conscientização ambiental de todos os envolvidos.

A pesquisa, portanto, tem o objetivo de analisar a conformidade das ações de gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos em uma instituição de ensino, que participa do sistema de logística reversa dos resíduos eletroeletrônicos, atendendo às normas legais.

2. Desenvolvimento

2.1 Cenário global dos resíduos eletroeletrônicos

A globalização, acompanhada do constante avanço de um comportamento consumista, tem colaborado para a mudança no padrão de aquisição dos produtos tecnológicos. Tal cenário tem acelerado a obsolescência de produtos eletroeletrônicos provocada pelo surgimento de novas tecnologias ou até mesmo de versões consideradas mais modernas do mesmo produto.

De acordo com Zanatta (2013), esse encurtamento da vida útil de um bem ou produto é denominado obsolescência programada. Nesse caso, o produto já é projetado para que sua durabilidade aconteça em um período reduzido, fazendo com que o consumidor adquira um novo produto em um espaço menor de tempo. Como consequência, a geração mundial de resíduo eletroeletrônico (REEE), em 2019, foi de 53,6 milhões de toneladas e somente 17,4% de todo esse “lixo” foi coletado e reciclado, segundo o relatório The Global E-waste Monitor 2020 da ONU (FORTI *et al.*, 2020).

Dados do mesmo relatório mostram que o Brasil está em primeiro lugar, quanto à geração de resíduos eletroeletrônicos na América do Sul, produzindo 2,1 milhões de toneladas dessa tipologia de resíduo (FORTI *et al.*, 2020). Argentina e Colômbia, segundo e terceiro colocados na América do Sul, geraram, respectivamente, 465 mil e 318 mil toneladas. Em termos globais, o Brasil só fica atrás do volume gerado pela China (10,1 milhões de toneladas), Estados Unidos (6,9 milhões de toneladas), Índia (3,2 milhões de toneladas) e Japão (2,6 milhões de toneladas) (FORTI *et al.*, 2020).

2.2 Gestão da cadeia reversa, as legislações brasileiras e a Administração Pública

Muitos equipamentos eletroeletrônicos, ao término da vida útil, passam a ser classificados como resíduo de equipamento eletroeletrônico ou resíduo eletroeletrônico (REEE), devendo ser descartado de forma adequada ao fim de seu uso por parte de um



detentor. Deve-se ter ciência dos riscos que estão presentes nessa dinâmica, principalmente quando se verifica que o descarte inadequado desse resíduo é altamente danoso ao meio ambiente. Alguns componentes possuem substâncias tóxicas em altas concentrações e, quando dispostos de forma incorreta podem liberar na natureza metais pesados, por exemplo, o chumbo, contaminando o solo e os lençóis freáticos. A inalação de certas substâncias químicas presentes pode causar danos neurológicos, renais, ósseos, circulatórios e até hipertensão, anemia e paralisia nos seres humanos (IMBROISI, 2007).

Silva, Lima e Villaça (2021) declararam que, além de parte da população não ter noção das consequências danosas que a destinação inadequada do lixo tecnológico pode causar, a maioria também não tem conhecimento acerca das possibilidades de reaproveitamento e reciclagem desse tipo de resíduo. Isso traz a importância da disseminação de informações científicas para a sociedade e a promoção de debates sobre a temática ambiental.

A preocupação com os resíduos tecnológicos a níveis nacional e internacional se reflete, também, pela carência de políticas públicas, leis e normas para gestão desses resíduos. No Brasil, por exemplo, a Lei n.º 12.305 que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) foi aprovada em 2010 após 19 anos tramitando no poder Legislativo. Leite (2017) afirma que a PNRS é inspirada nas regulamentações europeias e as principais determinações da PNRS resumem-se na responsabilização da implantação da logística reversa: imposição baseada no “princípio do poluidor-pagador”. Nesse caso, o ônus da responsabilidade do equacionamento do retorno dos produtos é transferido do governo para as empresas que produzem e comercializam produtos no mercado. A responsabilidade compartilhada engloba, portanto, toda a cadeia produtora, desde os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes, até mesmo o cidadão e titulares de serviços de manejo dos resíduos sólidos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos define logística reversa como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada. (BRASIL, 2010, art. 3º, inciso XII)

O sistema de logística reversa tem início com os consumidores, que devolvem os materiais pós-consumo em Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) ou diretamente nos estabelecimentos comerciais. Em seguida ocorre a separação dos produtos ou materiais que são retornados aos produtores ou seguem diretamente para etapas de condicionamento, remanufatura, reprocessamento, reparo, reciclagem ou reutilização. Ao final da vida útil e devolução ao fabricante, este tem a responsabilidade de fazer o reaproveitamento desses resíduos ou destinar de forma correta (BRASIL, 2010).

Em outubro de 2019, houve a assinatura de um acordo para demonstrar a responsabilidade e o comprometimento dos fabricantes de tecnologias com o meio ambiente. Na oportunidade foi fixado um acordo setorial para a Logística Reversa de Eletroeletrônicos entre a União e as entidades, públicas e privadas que compõem o setor. Este acordo representou um marco na legislação brasileira que já previa, através



da PNRS, que fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes adotassem um sistema de logística reversa (MMA, 2019).

Alinhado ao acordo setorial supracitado, o decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, estabeleceu normas para implementação de sistema de logística reversa obrigatória de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes (não incluindo as pilhas, baterias ou lâmpadas dos produtos eletroeletrônicos). O decreto obrigou as empresas do setor a implantarem sistemas de coleta desse tipo de resíduo e dar sua destinação correta.

No ano de 2022, a PNRS (12.305/2010) foi regulamentada por um novo decreto presidencial nº 10.936, que criou o Programa Nacional de Logística Reversa integrado ao SINIR (Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão de Resíduos Sólidos) e ao Planares (Plano Nacional de Resíduos Sólidos), a fim de que os processos que envolvam a operacionalização dos sistemas de Logística Reversa (LR) fossem otimizados.

No que tange às responsabilidades dos geradores dos resíduos sólidos e do Poder Público, disposto em seu art. 3º, os fabricantes, os importadores, os distribuidores, os comerciantes, os consumidores e os titulares de serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos são responsáveis pelo ciclo de vida dos produtos, provisionando, assim, uma responsabilidade compartilhada, com vistas a implementação de forma individualizada e encadeada. Com esse Decreto passou a ser priorizada a participação das cooperativas e de outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis, a atuarem no sistema de LR.

Apesar de toda a preocupação demonstrada com a gestão dos resíduos eletroeletrônicos, à luz das legislações e decretos ambientais, o cenário atual, que se baseia em um modelo de produção industrial, conhecido como economia linear, vem alcançando níveis capazes de interferir diretamente na capacidade do meio ambiente se recuperar. Nesse tipo de economia, as mercadorias são produzidas com matérias-primas virgens, transformadas, utilizadas e descartadas como resíduos na natureza, que são capazes de alterar o ecossistema. Mostra-se, então, um modelo difícil de ser mantido.

Nesse contexto, vem ganhando espaço um modelo, que procura desenvolver processos com um uso mais racional dos recursos naturais, atuando na redução do consumo ou no reaproveitamento dos produtos, conhecido por economia circular (EC) (EMF, 2012). O argumento central é de que não existiriam resíduos, pois os mesmos funcionariam como insumos para a produção de novos produtos ou mesmo, se prolongaria a vida útil de produtos para evitar a dissipação dos materiais na economia (SOUZA, 2021). Em consonância com um dos princípios da EC, deve-se pesquisar materiais que possam ser totalmente recuperados ou que possam ser utilizados o máximo da disponibilidade, antes mesmo de se propor alternativas de reciclagem atuais. Atende-se, portanto, a um dos objetivos da Lei nº 12.305/2010, artigo 7º, inciso II, que é “não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos” (BRASIL, 2010). Demonstra-se, também, que a EC é uma aliada da logística reversa, pois o retorno do resíduo para o ciclo produtivo, evitando que saia do sistema econômico, contribui para a minimização dos impactos ambientais gerados pela destinação inadequada dos resíduos.



A Administração Pública possui papel fundamental no desenvolvimento de uma economia sustentável tanto por ser um grande consumidor de produtos e serviço, como pelo seu papel na construção da consciência coletiva (MUGUET, 2023).

No que se refere ao ciclo de vida de um produto adquirido por um órgão da Administração Pública, este pode ser definido como as fases que compreendem as etapas do projeto do produto, que iniciam na aquisição das matérias-primas, passando pela produção, distribuição, consumo e descarte final do produto pós-uso, que virou resíduo (BRASIL, 2010). Um dos instrumentos para a gestão das contratações públicas sustentáveis é a Instrução Normativa nº 01/2010 do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão (MPOG), que “dispõe sobre os critérios de sustentabilidade ambiental na aquisição de bens, contratação de serviços ou obras pela Administração Pública Federal direta, autárquica e fundacional”. Os requisitos e especificações sustentáveis nas aquisições de recursos públicos, contratações de serviços, desfazimento e descarte que precisam ser considerados no processo licitatório devem ser consultados na Lei das Licitações e Contratos, no Decreto nº 7.746/2012 e pelo Guia Nacional de Contratações Sustentáveis (AGU, 2022).

3. Metodologia

Com a nova regulamentação da PNRS pelo Decreto nº 10.936/2022, a assertividade na responsabilização pelo encaminhamento de ações de implementação dos sistemas de logística reversa de produtos e embalagens pós-consumo objetiva transformar a realidade da gestão de resíduos do país. Além disso, evidencia-se que os órgãos da Administração Pública devem, portanto, desempenhar uma postura responsável ambientalmente dentro da cadeia produtiva onde está inserida.

Com base nessa perspectiva, o presente trabalho realiza uma breve revisão de literatura, por meio de pesquisa bibliográfica, sobre os temas que relacionam os resíduos eletroeletrônicos e bens inservíveis que tem a exigência legal de fazer parte de um sistema de logística reversa, em função, principalmente, da geração de impactos ambientais negativos com as formas de gerenciamento sustentável desses resíduos. Esses temas devem estar alinhados à PNRS.

Quanto aos procedimentos metodológicos, a estratégia adotada é de uma pesquisa documental (MARCONI, LAKATOS, 2022), investigando indicativos sobre a efetividade das ações realizadas no Cefet/RJ que estejam alinhadas com os preceitos da logística reversa dos resíduos eletroeletrônicos. Para tanto, os documentos legais de base são o Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022 e o Guia Nacional de Contratações Sustentáveis (AGU, 2022), cujo conteúdo é decomposto em fragmentos mais simples (CHIZZOTI, 2014) e posteriormente organizados por categoria (SÁ-SILVA, ALMEIDA, GUINDANI, 2009). Com o processo de análise do conteúdo dos documentos legais realizado, o mesmo procedimento é feito com os relatórios de gestão e editais de compras e de desfazimento do Cefet/RJ, no período entre 2017 e 2022 (LÜDKE, ANDRÉ, 2013). O intuito é o de elucidar as principais questões propostas pelo estudo – a geração dos resíduos eletroeletrônicos e o processo de desfazimento de bens, que ao fim de sua vida útil, se transformam em inservíveis, em uma instituição de ensino superior, como o Cefet/RJ. Esse tipo de resíduo integra, de acordo com o art. 33



da PNRS, o sistema de logística reversa, colaborando, assim, com uma destinação final ambientalmente adequada.

A escolha de percurso metodológico via pesquisa documental justifica-se por oferecer condições para a análise assertiva de uma fonte estável de dados, que não requer contato com os sujeitos da pesquisa, mas permite uma leitura aprofundada das fontes, constituindo um suporte técnico relevante na pesquisa qualitativa (LÜDKE, ANDRÉ, 2013).

4. Resultados

Levando em consideração o crescimento do setor de eletroeletrônicos acompanhado pelo padrão de consumo desenfreado de seus produtos, é importante reconhecer maneiras para gerir sustentavelmente a produção e o consumo de produtos. As Instituições de Ensino (IE) se apresentam como um fator importante na disseminação do desenvolvimento sustentável que ocorre através na incorporação de valores e práticas tanto nas disciplinas ministradas como em seu espaço físico (TRIGO, TRIGO, 2017), a partir da adoção de iniciativas sustentáveis.

Segundo Fagundes e Schreiber (2023), as instituições de ensino, em especial as instituições de ensino superior (IES), possuem a função de capacitar e conscientizar profissionais, que no mercado de trabalho precisarão desenvolver planos de ações voltados a administração dos resíduos sólidos gerados em seu espaço.

Para isso, precisam praticar o que ensinam, contribuindo para a formação de uma sociedade sustentável. Quando se trata da destinação de resíduos eletroeletrônicos, as IES devem ter uma atenção especial nesse quesito, pois são grandes consumidoras de equipamentos eletrônicos, principalmente equipamentos de Tecnologia da Informação (TI) como computadores, impressoras e copiadoras que frequentemente precisam ser substituídos. Caso não haja um gerenciamento adequado desses resíduos, configura-se a presença de riscos ambientais (AGAMUTHU; KASAPO; NORDIN, 2015).

O Estado tem o dever de incentivar a consciência e participação social, além de remodelar seus modos de consumo, por ser um grande consumidor. Assim, torna-se claro que os órgãos públicos devem exercer essa ideia em suas operações e compartilhar essa responsabilidade (MUGUET, 2023).

Tomando o Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - Cefet/RJ como objeto de estudo e considerando que esta é uma instituição de ensino pública, é relevante entender a relação com o papel da Administração Pública na busca por um desenvolvimento sustentável. Nos últimos anos, diversas práticas sustentáveis foram assumidas no Cefet/RJ. Apesar de já existir uma preocupação com sustentabilidade, as ações foram intensificadas a partir da criação da Divisão de Estratégia para Sustentabilidade Ambiental Institucional (DISAI), em 2017, que tem por objetivo transformar ideias em ações referentes à gestão e educação ambiental (CEFET/RJ, 2023).

No que tange a responsabilidade do Cefet/RJ na aquisição de lâmpadas fluorescentes, o Guia Nacional de Contratações Sustentáveis (AGU, 2022), primeiramente, recomenda que seja avaliada a aquisição de lâmpadas fabricadas com tecnologia mais avançada e que causem menos dano ambiental que as lâmpadas fluorescentes. A Resolução CONMETRO nº 01, de 05/07/2016, coloca o sistema de



logística reversa como requisito de conformidade para a importação e comercialização de lâmpadas fluorescentes. Além disso, o Acordo Setorial estabelecido em 25 de novembro de 2014 estabelece que a destinação final dos resíduos desses tipos de lâmpadas seja feita de forma ambientalmente adequada, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (MMA, 2014).

Ainda segundo o Guia de Contratações da AGU de 2022, no contrato para aquisição de lâmpadas fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista, é importante ressaltar a responsabilidade da contratada em realizar o recolhimento e descarte adequado dos produtos adquiridos. Esta obrigação contratual é dispensável somente nos casos em que ela possa gerar restrição a competitividade ou custo despropositáveis. Caso não seja incluída a obrigação, a instituição contratante deverá assumir o compromisso pela destinação ambiental adequada das lâmpadas.

Diante do exposto, não foram encontrados nos editais de aquisição de lâmpadas critérios de logística reversa relacionados a resolução CONMETRO nº 01, de 05/07/2016 ou ao acordo setorial para implantação do Sistema de Logística Reversa de Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista, conforme sugere o Guia Nacional de Contratações. No entanto, foram identificados critérios sustentáveis para a aquisição. Um ponto a ser observado é que os editais verificados não são direcionados somente a aquisição de lâmpadas; o que pode dificultar a inclusão dos critérios específicos de compra de lâmpadas no edital, conforme propõe a Advocacia Geral da União (AGU). Diante da ausência da obrigatoriedade da logística reversa no edital, o Cefet/RJ absorve a responsabilidade pela destinação ambientalmente adequada de tais lâmpadas adquiridas de acordo com o Guia de Contratações supracitado.

Em 2023, o Cefet/RJ realizou uma licitação para contratação de empresa especializada no serviço de coleta, transporte, descontaminação e reciclagem de lâmpadas fluorescentes inservíveis. Foram observados, no edital dessa licitação, os mesmos critérios encontrados no edital de 2019 para descarte de lâmpadas (BRASIL, 2017). Como a licitação era para contratação de empresa para realizar a coleta e o tratamento adequado das lâmpadas, não cabiam critérios de logística reversa no edital. A instituição se desfez das lâmpadas inservíveis localizadas nos *campi* Maracanã, Nova Iguaçu e Angra dos Reis.

Na categoria de equipamentos eletroeletrônicos do Cefet/RJ, existem os bens patrimonializados e os não patrimonializados. Os patrimonializados são equipamentos que recebem o registro patrimonial passando a integrar o Sistema Integrado de Patrimônio, Administração e Compras da instituição (SIPAC). São exemplos de bens patrimonializados: computadores, monitores, impressoras, aparelhos de ar-condicionado e outros bens do mesmo tipo, os quais devem seguir as recomendações do Guia de Contratações Sustentáveis da AGU (2022), com ressalvas quanto ao quesito de eficiência energética.

Já os bens eletroeletrônicos não patrimonializados, que são equipamentos de pequena dimensão não passam pelo registro patrimonial, e se transformam em resíduos eletroeletrônicos de pequeno porte, sendo deixados nos pontos de coleta do Cefet/RJ. Alguns também são trazidos pela comunidade interna e externa da IES e em conjunto são coletados e pesados pela Comissão Central de Coleta Seletiva Solidária (CCSS) e encaminhados às cooperativas/associações de catadores parceiras.



O Guia Nacional de Contratações Sustentáveis (AGU, 2022) define agrupamentos de produtos que podem ser considerados equipamentos eletroeletrônicos: aparelhos elétricos em geral e eletrodomésticos. Em ambos os casos, o referido guia menciona que o Decreto nº 10.240, de 2020, que estabeleceu sistema de logística reversa para produtos eletrônicos de uso doméstico, não se aplica a produtos eletrônicos de uso governamental.

Contudo, ao realizar o descarte dos equipamentos eletroeletrônicos patrimoniados, o Cefet/RJ, por se tratar de um órgão público federal, precisa iniciar o processo de desfazimento ou destombamento, conforme o Decreto nº 9.373, de 11 de maio de 2018. Assim, nos últimos anos, o Cefet/RJ vem desincorporando de seu patrimônio computadores, monitores, impressoras, *nobreaks* e estabilizadores, todos classificados como antieconômicos. Para tanto, foram alienados conforme legislação vigente (CEFET/RJ, 2022a).

Considerando os prazos estabelecidos pela portaria nº 385, de 28 de novembro de 2018, desde novembro de 2020, o Cefet/RJ dentre outros órgãos e entidades da Administração Pública devem utilizar a plataforma “Reuse.Gov” para realizar o desfazimento dos bens.

5. Discussões

A partir da análise do ciclo de vida dos bens no contexto do Cefet/RJ, é possível observar que a IES possui interesse em fazer o uso e destinação adequada dos seus bens até o momento do desfazimento, seguindo os preceitos legais. Tendo como referência a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), é notória a presença de possibilidades de reaproveitamento e adoção de práticas sustentáveis por parte da instituição no gerenciamento desses produtos, e respectivos resíduos.

Os produtos a serem adquiridos, antes de chegar ao Cefet/RJ, passam por um processo de licitação, que levam em conta critérios sustentáveis. A lei nº 12.349/2010, que é a lei de licitações e contratos, a Instrução Normativa nº 01/2010, o Decreto nº 7.746/2012 e o Guia Nacional de Contratações Sustentáveis de 2022 estabelecem critérios, práticas e diretrizes para promoção do desenvolvimento nacional sustentável nas contratações realizadas pela Administração Pública. De uma maneira geral, esses critérios foram identificados nos editais analisados para aquisição dos produtos.

Um ponto observado na avaliação dos editais é o fato de um único edital tratar da aquisição de inúmeros tipos de produtos ao mesmo tempo. Em se tratando de eletrônicos, essa prática não é a mais adequada ao processo, pois impede a presença de determinações específicas de cada um dos produtos, principalmente no pós-consumo, quanto aos critérios de sustentabilidade específicos para cada produto. A escolha da não inclusão desses critérios também pode estar ligada a restrição à competitividade e ao aumento de custo que a obrigação do cumprimento de serviços relacionados pode trazer. Quanto aos eletroeletrônicos, não há como o Cefet/RJ exigir a obrigatoriedade da logística reversa por parte do fornecedor dada a ausência de instrumentos que respaldem essa obrigatoriedade para o caso de eletroeletrônicos, que serão patrimoniados. Ao se desfazer desses resíduos, o Cefet/RJ segue as determinações dispostas pelo Decreto nº 9.373/2018.



Finalmente, é perceptível que o Cefet/RJ procurou se alinhar à PNRS, quando se trata de sua responsabilidade “compartilhada” com o gerenciamento dos resíduos, integrando-se ao sistema de logística reversa, que é oferecido, e buscando sensibilizar seus servidores e discentes na adoção de posturas e comportamentos mais responsáveis e sustentáveis, apesar das contrariedades e dificuldades encontradas.

6. Considerações finais

O consumo exacerbado de produtos eletroeletrônicos motivado pela obsolescência programada bem como, o aumento da consumação de lâmpadas fluorescentes, representam um risco ambiental significativo. O principal motivo é a presença de substâncias tóxicas na composição desses produtos, que ao se tornarem resíduos, podem entrar em contato com o meio ambiente, através do descarte inadequado afetando, dessa forma, o ecossistema.

Ao considerar que os órgãos e entidades da Administração Pública possuem a responsabilidade ambiental de fazer o uso adequado de bens e gerenciar os resíduos gerados, este artigo alcançou seus objetivos. Para tanto buscou mostrar que uma IES é responsável, a partir do momento que se encontra em conformidade com os critérios normativos e legais, incorporando práticas de sustentabilidade nos editais para aquisição de seus produtos e gerenciando seus resíduos, principalmente aqueles que fazem parte da cadeia de logística reversa, como uma forma de promoção e difusão do conhecimento. Nesse esteio, ressalta-se a importância das instituições da Administração Pública na incorporação de práticas de sustentabilidade em seus sistemas de gestão de resíduos sólidos, iniciando pelo uso consciente dos bens, privilegiando os preceitos da Economia Circular, contribuindo para a transformação da realidade de todos os agentes envolvidos no processo.

Nesse sentido, o desenvolvimento de práticas sustentáveis representa a potencialidade da educação ambiental como um instrumento de conhecimento, que consequentemente fomenta práticas mais profícuas e exitosas quanto a gestão de resíduos. Para tanto, notabiliza-se a continuidade do alinhamento dos setores já envolvidos nessas práticas de gestão no Cefet/RJ, de forma a garantir a manutenção e efetividade dos procedimentos adotados. Procura-se, dessa forma, que os agentes públicos tenham o consumo responsável e sustentável como norteador em seus processos de gestão.

No que tange às lacunas do presente artigo, observa-se a falta de trabalhos científicos mais recentes e que tratam sobre o Decreto nº 10.936/2022. Acrescenta-se o fato de ainda não haver dados compilados significativos acerca dos sistemas de logística reversa e da destinação de resíduos sólidos para períodos posteriores à nova regulamentação, o que restringe a possibilidade de traçar comparativos e triangular informações que pudessem corroborar ou refutar os achados da pesquisa.

De forma sintética pode-se afirmar que muito foi feito no Cefet/RJ quanto à sustentabilidade. Ressalta-se o potencial desta instituição como objeto de estudo para se analisar a conformidade das ações de gerenciamento de seus resíduos eletroeletrônicos quanto às diretrizes ambientais observadas em normas legais que colaboram para esse contínuo avanço rumo à sustentabilidade. Os achados da pesquisa não são definitivos,



mas visam contribuir com outras pesquisas semelhantes que possam ser conduzidas em instituições públicas ou privadas.

Referências

AGAMUTHU, P.; KASAPO, P.; NORDIN, N.A.M. E-waste flow among selected institutions of higher learning using material flow analysis model. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 105, parte A, n. 3, p. 177-185, 2015.

AGU - Advocacia Geral da União. **Guia Nacional de Contratações Sustentáveis**. 5 ed. Atualizada. Brasília: AGU, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/agu/pt-br/composicao/cgu/cgu/guias/gncs_082022.pdf Acesso em: 12 ago. 2023.

BRASIL. **Lei nº 8.666, de 21 de junho de 1993**. Diário Oficial da União, Brasília-DF, 22/06/1983.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Diário Oficial da União República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm Acesso em: 20 mar. 2023.

BRASIL. **Lei nº 12.349, de 15 de dezembro de 2010**. Publicada no Diário Oficial da União, Brasília-DF, 16/12/2010.

BRASIL. **Decreto nº 7.746, de 5 de junho de 2012**. Diário Oficial da União, Brasília-DF, 06/06/2012.

BRASIL. **Decreto nº 9.178, de 23 de outubro de 2017**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9178.htm Acesso em 05 ago. 2023.

BRASIL. **Decreto nº 9.373, de 11 de maio de 2018**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9373.htm Acesso em: 13 ago. 2023.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096> Acesso em: 20 jul. 2023.

BRASIL. **Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022**. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.936-de-12-de-janeiro-de-2022-373573578> Acesso em: 20 jul. 2023.

CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. **Responsabilidade e movimentação de bens permanentes**. 2022a. Disponível em: <http://www.cefet-rj.br/index.php/patrimonio> Acesso em: 15 ago. 2023.



CEFET/RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. **Sustentabilidade** 2023. Disponível em <http://www.cefet-rj.br/index.php/sustentabilidade-governanca> Acesso em: 20 jul. 2023.

CHIZZOTTI, A. **Pesquisa qualitativa em ciências humanas e sociais**. 6 ed. Petrópolis: Vozes, 2014.

CRISTÓVAM, J. S. S; FERNANDES, H. Licitações públicas e sustentabilidade: uma análise da aplicação de critérios nas compras de órgãos públicos federais em Florianópolis (SC). **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 370-392, maio/ago. 2018.

EMF. Ellen Macarthur Foundation. Towards the circular economy. **Economic and business rationale for an accelerated transition**. Isle of Wight: EMF, 2012. vol. 1. In:

FAGUNDES, C; SCHREIBER, D. Práticas de gestão ambiental em uma instituição de ensino superior: um estudo de caso em uma universidade localizada no sul do Brasil. **Revista Gestão e Secretariado**, v. 14, n. 5, p. 6983-6999, 2023. Disponível em: <http://doi.org/10.7769/gesec.v14i5.2092> Acesso em: 15 ago. 2023.

FORTI, V.; BALDE, C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. Rotterdam: United Nations Press, 2020.

IMBROISI, D. **Os riscos do lixo eletrônico: resíduos derivados desses materiais, se não forem controlados podem resultar em catástrofe ambiental**. Brasília: UnB, 2007.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Resolução CONMETRO/ MDIC n.º 1, de 5 de julho de 2016. Disponível em: <http://www.ctpconsultoria.com.br/pdf/Resolucao-Conmetro-01-de-05-07-2016.pdf> Acesso em 1 ago. 2023

LEITE, P. R. **Logística Reversa: Sustentabilidade e Competitividade**. 3 ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

LÜDKE, M.; ANDRÉ, M.E.D.A. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. 2 ed. São Paulo: EPU, 2013.

MARKONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia científica**. São Paulo: Atlas, 2022.

MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo Setorial de Lâmpadas Fluorescentes de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2014.



MMA. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo Setorial para implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes.** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2019

MPOG - Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Instrução Normativa nº 1, de 19 de janeiro de 2010.** Publicada no Diário Oficial da União, Brasília, de 20/01/2010.

MPOG. Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão. **Portaria nº 385, de 28 de novembro de 2018. Institui o Sistema Integrado de Gestão Patrimonial - Siads, no âmbito da Administração Pública federal direta, autárquica e fundacional e empresas públicas dependentes do Poder Executivo Federal.** Publicada no Diário Oficial da União, Brasília, de 29/11/2018.

MUGUET, R. S. **Licitações públicas: análises e propostas de critérios de sustentabilidade em organizações militares.** 86 f. 2023. Dissertação (Mestrado em Administração e Desenvolvimento Empresarial) - Universidade Estácio de Sá, 2023

PEREIRA, M.M.F.; DE OLIVEIRA, L.T. Responsabilidade compartilhada na política nacional de resíduos sólidos: aplicabilidade da norma tributária ambiental indutora. **Direito e Desenvolvimento**, v. 10, n. 2, p. 322-335, 2019.

SÁ-SILVA, J.R.; ALMEIDA, C.D.DE; GUINDANI, J.F. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. **Revista brasileira de história & ciências sociais**, v. 1, n. 1, p. 1-15, 2009.

SANTOS, J. A. Logística reversa como ferramenta para a sustentabilidade: um estudo sobre a importância das cooperativas de reciclagem na gestão dos resíduos sólidos urbanos. **Reuna**, v.17, n.2, p. 81-96, 2012.

SILVA, G. R. A.; LIMA, J. S.; VILLAÇA, B. X. S. Gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos dentro da Universidade Federal do Pará. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 3, 2021.

SOUZA, M. A. **Economia circular: o mundo rumo à 5ª revolução industrial.** Campinas – SP: Unitá Editora, 2021.

TRIGO, J. A.; TRIGO, A. G. M. A Gestão Ambiental De *Campi* Universitários Sustentáveis. **R. Científica UBM**. v. 19, n. 36, p. 1-22, 2017.

ZANATTA, M. **A obsolescência programada sob a ótica do direito ambiental brasileiro.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Ciências Jurídicas e Sociais) - Faculdade de Direito da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. 2013.



Lithium Extraction from Lithium-ion Batteries: Pyro and Hydrometallurgical approaches

SOBRAL, L. G. S^{1*}, Viana Junior, I¹, Oliveira, A. D. N¹, Batista, M. M.¹, Wisniewski, C. R.²

1. Metallurgical and Environmental Processes Coordination / CETEM – Centre for Mineral Technology, Brazil, Researchers, sobrallui@gmail.com and +55 21 99615-1842
2. CEO of Euro Metal Brazil Mining Company Limited

Abstract

Different sorts of Batteries are used in many diversified applications such as cars, radios, laptops, mobile phones, and watches. They are classified as primary and secondary batteries. The former one is known as alkaline batteries made up of zinc and manganese as primary source and mainly used for household purposes, which convert directly chemical energy into electrical energy. The later one is usually made up of nickel (Ni), cadmium, nickel metal hydride or lithium-ion and it is mainly used in mobile phones, electronic items, cameras etc. The main concern of using batteries is the threat to the environment at the end of their usages. Among all type of batteries, Lithium-ion batteries (LIBs) are gaining world-wide interest owing to their use in almost all modern life devices. In addition, it is of paramount importance to develop new technologies to minimize any environment impact caused while disposing of such heavy metal bearing residues, since, on the one hand, the metals they contain can affect the environment and, on the other hand, such metals are valuable at an industrial level. In this work, the recoveries of lithium and manganese from the cathodes of exhausted lithium-ion batteries will be investigated using a pyrometallurgical chlorination process, followed by a hydrometallurgical process for the proper solubilisation of the lithium, manganese and cobalt chlorides formed. The tests were carried out in isothermal conditions, in alumina reactor so that it will be possible to operate in corrosive atmospheres. The effect of temperature and reaction time on lithium, manganese and cobalt extractions were also considered. The reagents, products and solid residues of chlorination were characterized by atomic absorption spectrometry (AAS) and X-ray diffraction (XRD). The experimental results were analysed to assess the efficiency of lithium, manganese and cobalt extractions as LiCl, MnCl₂ and CoCl₂, respectively. Once these metals were solubilized, lithium was precipitated in the form of carbonate, which is the raw material for the subsequent production of the aforementioned batteries.

Keywords: Lithium-ion batteries, pyro and hydrometallurgical processes.

*Corresponding author: Luis Sobral Metallurgical and Environmental Processes Coordination/CETEM – Centre for Mineral Technology, Senior Researcher, Av. Pedro Calmon, 900, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. Cell Phone: +55 21 99615-1842. Email: sobrallui@gmail.com



Introduction

A lithium-ion battery is a type of rechargeable battery, which are commonly used in portable electronic devices and electric vehicles and are growing in popularity for military and aerospace applications.[1]

In these batteries, lithium ions move from the negative electrode, through an electrolyte, to the positive electrode during discharge and back during charging. Lithium-ion batteries use an intercalated lithium compound as the material on the positive electrode and typically graphite on the negative electrode. The batteries have a high energy density, no memory effect (except LFP cells – lithium iron phosphate) [2] and low self-discharge. However, they can pose a safety hazard as they contain flammable electrolytes and, if damaged or improperly charged, can lead to explosions and fires.

Chemical, performance, cost, and safety characteristics vary among types of lithium-ion batteries. Portable electronics primarily use lithium polymer batteries (*i.e.*, with a polymer gel as the electrolyte), a lithium cobalt oxide (LiCoO_2) cathode material, and a graphite anode, which together provide a high energy density.[3-4] In the case of Lithium Iron Phosphate (LiFePO_4), Lithium Manganese Oxide (LiMn_2O_4) or Li_2MnO_3 -based Lithium Rich Layer Materials (LMR-NMC) and Cobalt, Manganese, Lithium Nickel Oxide (LiNiMnCoO_2 or NMC) may offer longer lives and may have better energy capacity. These batteries are widely used in power tools, medical equipment and other functions. NMC and its derivatives are also widely used in electric vehicles.

Research areas for lithium-ion batteries include extending lifespan, increasing energy density, improving safety, reducing costs, and increasing charging speed,[5] among others. Other research is ongoing in the area of non-flammable electrolytes as a way to increase safety based on the flammability and volatility of the organic solvents used in the typical electrolyte. Strategies include aqueous lithium-ion batteries, solid ceramic electrolytes, polymeric electrolytes, ionic liquids, and strongly fluorinated systems. [6-9]

The chemical reactions that occur inside these batteries [10], in the case of the cathode compound LiCoO_2 , during charging, are shown in Eqs. (1–2). Furthermore, reverse reactions occur during discharge.



Experimental and Results

Figure 1 shows an outline of the reaction system used in the extraction of lithium and other metallic components from exhausted lithium-ion batteries. In Figure 2, the complete reaction system used in the experiments can be seen.

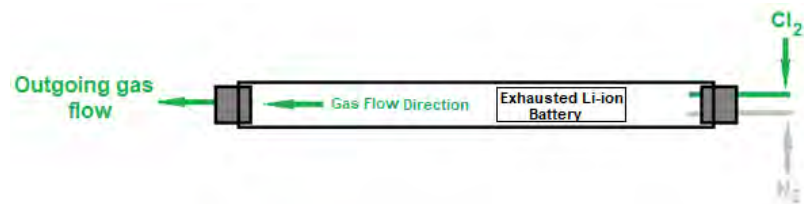


Figure 1- Outline of the reaction system for generating water soluble metal chlorides.

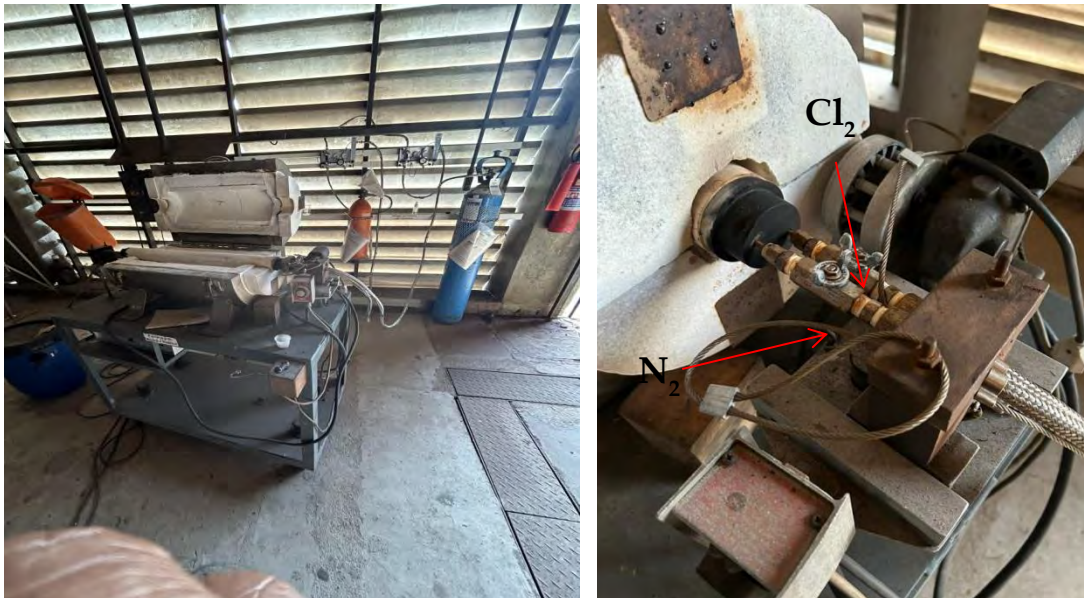
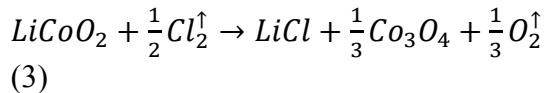


Figure 2- Reaction system used in lithium extraction tests from exhausted lithium-ion batteries.

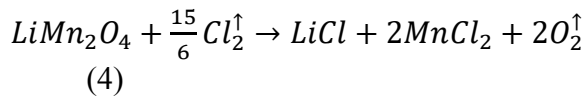


This system consists of a horizontal furnace, equipped with an alumina reactor where the exhausted batteries are inserted. At the beginning of the operation, the temperature range used was 400 to 500 °C, under a continuous flow of nitrogen so that the referred battery was destroyed in the absence of oxygen and humidity. Once this temperature was reached, a flow of chlorine gas was passed through the reactor for the proper transformation of the elements present (*i.e.*, Li, Co and Mn) into the respective water-soluble chlorides.

The first zone, between 400 and 500 °C, presents a mass gain that is a consequence of LiCl generation due to partial chlorination of LiCoO₂ from the cathode, as shown in reaction 3:



In the second region, between 500 and 650 °C, a significant increase in mass gain is observed, which can be attributed to the continuation of reaction (3) and to the chlorination of LiMn₂O₄:



During the passage of chlorine through the reactor, a continuous flow of nitrogen was also kept to avoid any reaction of the unreacted lithium compound with the humidity and oxygen, perhaps present, inside the reactor. This chlorine flow was stopped after 15 minutes of reaction, enough time for the complete formation of the referred chlorides. Once the chlorination reactions have been finished, the furnace was turned off and remained so until the complete cooling of the reactor.

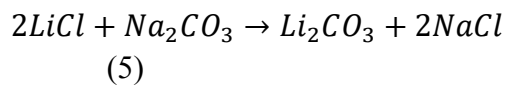
Once at room temperature, the inside of the furnace was washed with water for complete solubilisation of the formed chlorides. Once in solution, the extraction of metals was evaluated by analysing their concentrations by atomic absorption spectrometry. Table 1 shows the percentages of lithium, manganese and cobalt extractions according to the temperatures used.



Table 1- Metal extraction according to the used temperature.

Extraction of Lithium, Cobalt and Manganese, %		
Temperature, °C	400	600
Li	95	98
Mn, Co	-	94 & 97

As can be observed from the Table 1, the lithium extraction using 400 °C was just enough for extracting 95 % of the lithium content. However, this extraction could be even higher extending the chlorine flow period without extracting manganese and cobalt. On the other hand, when the temperature is increased to 600 °C near the maximum lithium extraction was reached, with high extraction of manganese and cobalt, which means that even extracting them the resulting leachate could be treated with sodium carbonate solution to precipitate lithium carbonate (Li_2CO_3), as shown in reaction 5, the only insoluble carbonate among the others present. This lithium carbonate was thoroughly washed with hot water to free it from other soluble carbonates.



The other elements present in the aqueous phase were separated according to their chemical characteristics.

This treatment process can be applied to recover lithium from cathode materials of various chemical compositions and therefore to a wide variety of commercially available lithium-ion batteries.

The gaseous emanations leaving the reactor were collected in a sodium hydroxide solution for the proper formation of sodium hypochlorite, as shown in reaction 6 and, with this, to avoid environmental contamination.

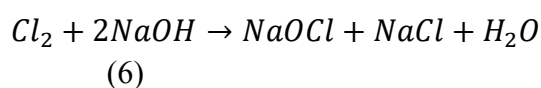


Figure 3 shows the physical aspects of the metal salts that make up lithium ion batteries from their precipitation processes from aqueous leachate.

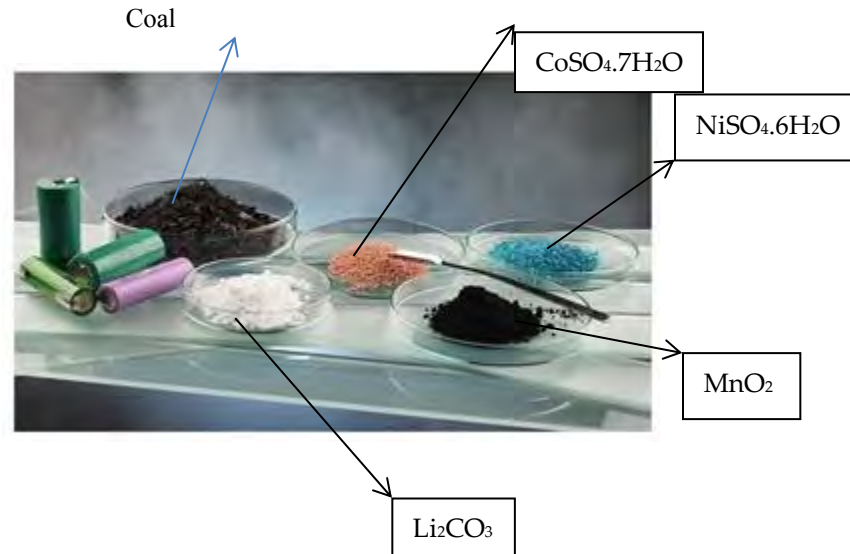


Figure 3- Physical aspects of the constituent compounds of lithium-ion batteries after selective precipitation processes.

Conclusions

Experimental results showed that the pyrometallurgical process of chlorination, followed by aqueous leaching of the remaining solid phases, is an efficient route to extract lithium, manganese and cobalt at moderate temperatures. The results indicated that the chlorination of mixed oxides from exhausted lithium-ion batteries gives the following products: LiCl at 400 °C, LiCl and MnCl₂ at 500 °C and LiCl, MnCl₂ and CoCl₂ at 600 °C, with LiCl selectively extracted at 400 °C. Finally, we do believe that the metals extraction efficiencies might be enhanced by extending the chlorination period.

References

[1]- Ballon, Massie Santos (14 October 2008). "[Electrovaya, Tata Motors to make electric Indica](#)". cleantech.com. Archived from [the original](#) on 9 May 2011. Retrieved 11 June 2010.



- [2] ["Memory effect now also found in lithium-ion batteries"](#). Retrieved 5 August 2015.
- [3]-Mauger, A; Julien, C.M. (28 June 2017). ["Critical review on lithium-ion batteries: are they safe? Sustainable?"](#) (PDF). *Ionics*. 23 (8): 1933–1947. doi:10.1007/s11581-017-2177-8. S2CID 103350576.
- [4]- [Jump up to:^a ^b](#) Mark Ellis, Sandy Munro (4 June 2020). [Sandy Munro on Tesla's Battery Tech Domination](#) (video). E for Electric. Event occurs at 3:53–5:50. Retrieved 29 June 2020 – via YouTube.
- [5] [Eftekhari, Ali \(2017\). "Lithium-Ion Batteries with High Rate Capabilities". *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 5 \(3\): 2799–2816. doi:10.1021/acssuschemeng.7b00046.](#)
- [6] [Hopkins, Gina \(16 November 2017\). "Watch: Cuts and dunks don't stop new lithium-ion battery - Futurity". *Futurity*. Retrieved 10 July 2018.](#)
- [7] [Chawla, N.; Bharti, N.; Singh, S. \(2019\). "Recent Advances in Non-Flammable Electrolytes for Safer Lithium-Ion Batteries". *Batteries*. 5: 19. doi:10.3390/batteries5010019.](#)
- [8] [Yao, X.L.; Xie, S.; Chen, C.; Wang, Q.S.; Sun, J.; Wang, Q.S.; Sun, J. \(2004\). "Comparative study of trimethyl phosphite and trimethyl phosphate as electrolyte additives in lithium ion batteries". *Journal of Power Sources*. 144: 170–175. doi:10.1016/j.jpowsour.2004.11.042.](#)
- [9] [Fergus, J.W. \(2010\). "Ceramic and polymeric solid electrolytes for lithium-ion batteries". *Journal of Power Sources*. 195 \(15\): 4554–4569. Bibcode:2010JPS...195.4554F. doi:10.1016/j.jpowsour.2010.01.076.](#)
- [10] Liu et al., Understanding electrochemical potentials of cathode materials in rechargeable batteries, *Materials Today*, Volume 19, Number 2, March 2016.



LOGÍSTICA REVERSA DOS ELETROELETRÔNICOS: UMA AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DA FASE DE TRANSPORTE

Bruna Guedes Cessel ¹; Isadora Marcela de Campos ²; Thamires Martinho Prados ³;
Giancarlo A. Lovón-Canchumani ^{4*}
*giancarlo.lovon@ufpr.br

Resumo

O crescente aumento dos resíduos eletroeletrônico (REE), vem gerando preocupações globais, devido aos avanços tecnológicos e aos impactos ambientais gerados. O presente trabalho tem como objetivo avaliar a fase de transporte da coleta de eletroeletrônicos em um município do norte do Paraná, no período de coleta de 2019. A partir da metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida – ACV, baseada nas normas ISO 14040 e ISO 14044, sendo essencial para compreender o impacto total gerado pelo processo/produto e identificar as possíveis causas, conseguindo mitigar os problemas gerados ao meio ambiente, dois métodos de avaliação de impacto ambiental, IPCC e ReCiPe, foram empregados. Os resultados mostraram que em 2019 foram coletadas 3,7 toneladas de eletroeletrônicos, e a fase de transporte para reciclagem emitiu 61,1689 kg CO₂ eq. Os impactos ambientais gerados mais relevantes foram nas categorias de formação de material particulado fino, escassez de recursos minerais, e aquecimento global.

Palavras-chave: Impactos ambientais; Reciclagem; Resíduos.

1. Introdução

Devido às crescentes regulamentações ambientais, a possibilidade de recuperar recursos materiais valiosos para o mercado secundário e a adoção de práticas de negócios sustentáveis, ao longo das duas últimas décadas, o conceito de logística reversa (LR) tem sido reconhecido e amplamente aplicado nas indústrias de manufatura em escala global. A definição de LR, conforme (Islã, M.; Huda, N.; 2018), abrange o termo frequentemente utilizado para descrever o papel da logística na reciclagem, no descarte de resíduos e na gestão de materiais perigosos; uma abordagem mais abrangente engloba todas as questões relacionadas às atividades logísticas conduzidas para a diminuição das fontes, a reciclagem, a substituição, a reutilização de materiais e o descarte.

O aumento cada vez maior de resíduos eletroeletrônicos (REE) está causando crescente preocupação global (Liu et al; 2023) devido ao considerável impacto ambiental que eles provocam. Segundo o relatório global E-Waste Monitor 2017 da Universidade das Nações Unidas (UNU) e da Associação de Resíduos Sólidos, houve um aumento de 8% na geração de resíduos eletrônicos, atingindo 44,7 milhões de toneladas em 2016, em comparação com 2014. Anualmente, mais de 53 milhões de toneladas de equipamentos eletroeletrônicos e pilhas são descartados globalmente,



conforme o The Global E-waste Monitor 2020. Enquanto isso, o número de dispositivos em todo o mundo aumenta cerca de 4% ao ano. Em 2019, só Brasil descartou mais de 2 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos, sendo menos de 3% reciclados, de acordo com relatório da Universidade das Nações Unidas (Magalhães et al.; 2021).

Além de serem produzidos em grandes quantidades, os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) também contêm várias substâncias perigosas, como chumbo e outros metais pesados (Sepúlveda et al., 2010). Como medida para combater esse crescente problema, diversos países implementaram leis visando a diminuição de substâncias perigosas nos REEE e o estímulo à reciclagem. Exemplos incluem as Diretivas de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE) da União Europeia (UE) (União Europeia, 2002a) e a Restrição de Substâncias Perigosas (RoHS) (União Europeia, 2002b).

No ano de 2010, o Brasil estabeleceu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Essa política definiu princípios, instrumentos, diretrizes, metas e ações direcionados para a gestão integrada e ambientalmente responsável dos resíduos sólidos. De acordo com essa legislação, o setor de produtos eletrônicos é obrigado a implementar sistemas de logística reversa para resíduos eletroeletrônicos (REEE). Esses sistemas englobam um conjunto de medidas, procedimentos e recursos que visam facilitar a coleta, reutilização e reciclagem de resíduos sólidos na indústria, ou providenciar uma destinação alternativa que seja ambientalmente adequada. A PNRS contempla várias tipologias diferentes de resíduos (PNRS, 2019).

Neste contexto, a reciclagem surge como uma alternativa de destinação tanto para resíduos eletroeletrônicos quanto para o lixo comum. Ela proporciona uma maneira apropriada de reutilizar esses materiais, minimizando os impactos ambientais que ocorreriam com descartes inadequados. Contudo, é importante reconhecer que a reciclagem também acarreta impactos ambientais, especialmente relacionados ao transporte, que envolve a queima de combustíveis fósseis e a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera (Forti et al., 2020).

Uma ferramenta que pode subsidiar a logística reversa é a avaliação do ciclo de vida (ACV) é uma ferramenta, baseada nas normas (Associação Brasileira de Normas Técnicas., 2009) e (Associação Brasileira De Normas Técnicas. ABNT NBR ISO 14044., 2009), utilizada para avaliar holisticamente e quantifica os impactos de cada estágio do ciclo de vida de um produto e/ou processo, como resultado identifica possíveis pontos críticos, classificam em categorias de impacto e são complementares às avaliações ambientais tradicionais (Vahidi et al., 2016a).

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a fase de transporte da coleta de eletroeletrônicos em um município do norte do Paraná, no período de coleta de 2019.

2. Logística reversa dos Eletroeletrônicos

No Brasil, os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estão alinhados com as nações que colocam em vigor, como o do poluidor-pagador e do protetor-recebedor. Isso envolve a colaboração entre diferentes esferas governamentais, o setor empresarial e outros segmentos da sociedade. Além disso, a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto é enfatizada, conforme observado por (Brasil 2010a; Novi et al. 2013 e Santos et al. 2019). Nesse contexto, os sistemas de



coleta seletiva e logística reversa surgem como principais instrumentos (Zhang et al., 2011).

Segundo Chaves e Batalha (2006), é fundamental que os governos criem regulamentações que assegurem a responsabilidade das empresas e dos cidadãos na implementação da logística reversa. Dentro dos principais processos, encontra-se a reciclagem.

O gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos ganhou relevância nos fluxos de resíduos sólidos urbanos, não apenas devido ao aumento das vendas desses equipamentos, mas também por causa das substâncias perigosas presentes em seus componentes (ARAUJO, 2013).

Ao longo do ciclo de vida dos produtos de REEE, diversas fases causam impactos ambientais substanciais. A mineração dos metais usados nesses produtos, incluindo os raros presentes em pequenas quantidades nos minérios, resulta em impactos ambientais notáveis (ARAUJO, 2013).

De acordo com Dat et al., (2012) a implementação da logística reversa pós-consumo traz desafios que demandam esforços tanto do setor público quanto do privado. Andrade (2013) destaca os principais obstáculos mencionados pelas indústrias, incluindo a concentração das empresas de reciclagem. Há desafios relacionados aos custos operacionais abrangendo logística, recuperação e comercialização de materiais, bem como a baixa agregação de valor aos itens recuperados em comparação com os custos operacionais elevados.

Diversas pesquisas abordando a reciclagem de materiais REEE destacam as vantagens ambientais da reciclagem em relação à produção inicial desses materiais (Baxter et al.; Choi et al., 2006, Valero Navazo et al., 2014; Wäger e Hischier, 2015; Zeng et al.; 2018).

Uma percepção relevante ao realizar a ACV em sistema de gerenciamento de resíduos, embora fundamental, é que todas as ações relacionadas à gestão de resíduos (coleta, tratamento, entre outros), representam um encargo para o meio ambiente, devido às emissões diretas decorrentes das atividades ou aos efeitos ambientais dos materiais e da energia utilizados para operar o sistema (CHRISTENSEN, 2020).

3. Materiais e métodos

A metodologia utilizada foi a ACV junto com as normas ISO 14040 e ISO 14044, seguindo os quatro passos citadas na mesma, sendo: definição do objetivo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos dados. O estudo faz a avaliação dos benefícios e obrigações ambientais relacionados a logística reversa dos REE na cidade de Jandaia do Sul, localizada no norte do Paraná. Sua principal motivação é apresentar uma estrutura que possa ser utilizada para apoiar a gestão de indicadores ambientais na logística reversa do REE. As descrições da quantidade dos REE são advindas dos resultados de um projeto de extensão, que busca levar a conscientização ambiental para escolas, comunidade acadêmica e toda a população do município e região. A cada ano é realizado uma coleta dos REE da cidade e disponibilizado para a reciclagem, o trabalho considerou a coleta realizada no ano de 2019. A Tabela 1 mostra todos os itens coletados e as respectivas quantidades.



A fase de transporte da coleta de REE vai de Jandaia do Sul, e são enviados para Mandaguari, onde a Associação dos Catadores de mandaguari (Acaman) realiza a separação dos itens. Após isso, são vendidos a uma empresa localizada em Sarandi, a qual é responsável pelo desmonte e encaminhamento para Curitiba, onde acontece a reciclagem e última parte da cadeia.

Equipamentos	Nº	Equipamentos	Nº	Equipamentos	Nº
Toner	307	Ferro de passar	8	Instrumento médico	2
TV	76	Nobreak	7	Tocafitas	2
Celular	73	Microfone	6	Termômetro	2
Receptores de satélite	61	VHS	6	Tradutores	2
Câmera de					
Cabos	60	Ar condicionado	5	segurança	2
Teclado	58	Micro-ondas	5	GPS	2
Caixa/aparelho de som	48	Carregador portátil	4	Máq. de cartão	1
Gabinete	40	Extensão	4	Máq. de escrever	1
Controle	37	Batedeira	4	Cortador de papel	1
Mouse	35	Joystick	4	Radar	1
Impressora	34	Ventilador	4	Dispenser de água	1
Telefone	32	Furadeira	4	Impressora de nota	1
Monitor	30	Lanterna	3	Centrífuga	1
Componente de					
computador	25	Webcam	3	Aparador de pelo	1
Calculadora	21	Chuveiro	3	Geladeira	1
Notebook	13	Autofalante	3	Aspirador de pó	1
Câmera	12	Secador de cabelo	3	Secadora	1
Fones	11	Chapinha	3	Filtro para aquário	1
DVD	10	Videogame	2	Lixadeira	1
Relógio	9	Luminária	2	Amplificador	1
Liquidificador	9	Barbeador	2	Balança	1
Tablets	8	Scanner	2	TOTAL	1123

Tabela 1- Listagem de eletrônicos coletados (2019)

Fonte: PAS (2019)

A unidade funcional do estudo abrange todo o processo de coleta de Jandaia do Sul, com a área geográfica delimitada de Jandaia do Sul vai até a etapa de separação em



Mandaguari. Em seguida, engloba a fase de pré-reciclagem na cidade de Sarandi e por último, o transporte para reciclagem em Curitiba.

O sistema foi modelado de acordo com o ciclo de vida, levando em consideração as entradas e saídas do inventário de ciclo de vida. A delimitação desse sistema está representada na Figura 1, que evidencia que o foco do estudo está na análise do transporte entre o descarte, separação e desmonte (pré-reciclagem).

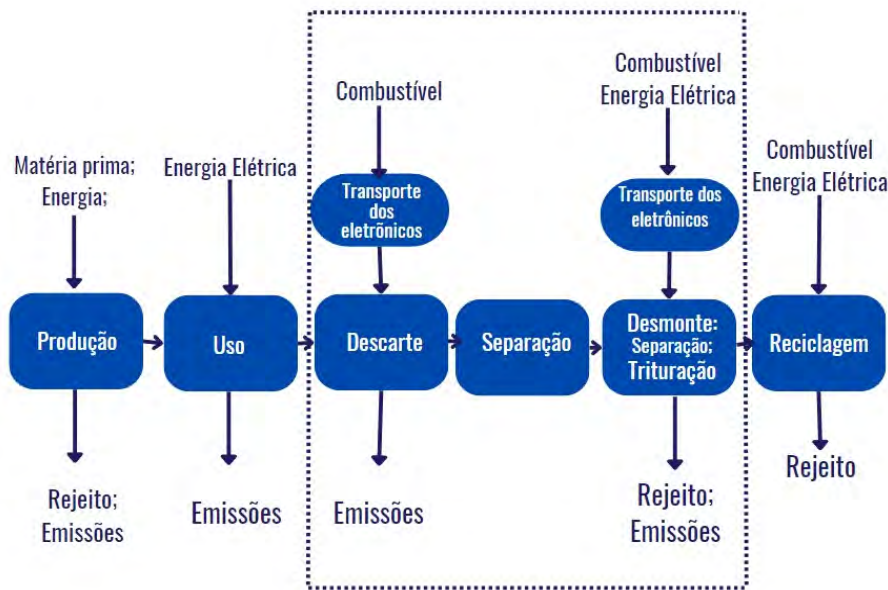


Figura 1 - Modelagem do sistema

- Descarte: o descarte é feito em Jandaia do Sul, e recolhido e recolhido mediante ação do Projeto Práticas Ambientais Sustentáveis, da UFPR;
- Separação: a separação é feita pela Acaman, e que separam todos os itens, e vendem para a empresa Fênix Reciclagem;
- Desmonte: quando os eletroeletrônicos chegam a Sarandi, eles devem ser desmontados para seguirem para a reciclagem. Os itens podem ser separados de acordo com a sua classificação (eletrodomésticos, monitores, celulares). Depois, são separados os tipos de materiais (plástico, metal, vidro, borracha) e componentes (cabos, fios, fonte, placa de circuito impresso) que tenham valor de mercado;
- Reciclagem: os itens são vendidos para uma empresa de Curitiba, responsável pela reciclagem.

A Coleta de REE em Jandaia do Sul, uma vez a ano e o transporte de 8 km de Jandaia do Sul à Mandaguari (separação - Acaman), 23,4 km de Mandaguari à Sarandi (pré-reciclagem Fênix) e 419,5 km de Sarandi à Curitiba (recicladora). O valor utilizado foi o de 1123 itens, pesando aproximadamente 3,7 toneladas. Os eletroeletrônicos são buscados na cidade de origem por um caminhão, que faz o transporte dos itens para as posteriores cidades.



Os dados secundários, dos inventários de produção de caminhão, diesel, gasolina e Etanol foram obtidos no banco de dados *Ecoinvent* e tratamento dos dados foi a *software SimaPro 9*, que fornece diversos valores de cargas ambientais.

3.2 Inventário

Os inventários foram de acordo com 1 tkm e os dados da tabela foram adequados em todas as etapas de análise para representar a realidade do estudo, como mostrado na Tabela 2.

Entradas	Unidade	Valor
Caminhão > 32 toneladas	p	8,85E-08
Diesel	kg	0,010371
Diesel com baixo teor de enxofre	kg	0,003887
Saídas – emissões	Unidade	Valor
Amônia	kg	1,42E-07
Arsênico	kg	1,43E-12
Benzeno	kg	3,61E-07
Cádmio	kg	1,24E-10
Dióxido de carbono, fóssil	kg	0,045013
Monóxido de carbono, fóssil	kg	8,22E-05
Cromo	kg	4,28E-10
Cromo VI	kg	8,55E-13
Cobre	kg	3,02E-10
Monóxido de dinitrogênio	kg	6,34E-07
Mercúrio	kg	7,56E-11
Metano, fóssil	kg	5,19E-07
Níquel	kg	1,25E-10
NMVOC, compostos orgânicos voláteis não metano, origem não especificada	kg	2,11E-05
Particulados	kg	2,11E-05
Selênio	kg	1,43E-12
Dióxido de enxofre	kg	1,08E-05
Zinco	kg	1,08E-05

Tabela 2 - Inventário de insumos e emissões do transporte de 1123 REE (2019)

Fonte: Adaptado do *SimaPro* (2021)

3.3 Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida – AICV

No processo de avaliação do impacto no meio ambiente AICV, foram utilizados dois métodos de avaliação, sendo eles: referente às emissões de gases de efeito estufa, seguindo as diretrizes do IPCC, o método ReCiPe.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), estabelecido em 1988 pela Organização Meteorológica Mundial (OMM), tem como objetivo avaliar toda informação científica relacionada às mudanças climáticas, identificando suas origens, impactos e potenciais riscos tanto para a humanidade quanto para o meio ambiente. O painel enfatiza os principais efeitos ambientais e propõe maneiras de reduzir as implicações dessas transformações.



Na metodologia ReCiPe são utilizados as seguintes categorias de impactos ambientais associadas às três categorias de danos: Categoria de danos à saúde humana (em DALY - disability-adjusted life year - anos de vida perdidos ajustados por incapacidade, mede-se simultaneamente o efeito da mortalidade e dos problemas de saúde que afetam a qualidade de vida dos indivíduos): mudanças climáticas; depleção de ozônio; toxicidade humana; formação fotoquímica; material particulado; radiação ionizante; Categoria de danos aos ecossistemas (em espécies/ano): mudanças climáticas ecossistemas; acidificação terrestre; eutrofização água; ecotoxicidade terrestre, ecotoxicidade água e ecotoxicidade marinha; transformação da terra natural; ocupação da terra agrícola e urbana; Categoria de danos de consumo de recursos (em unidade monetária \$): depleção de recursos minerais; depleção de combustíveis fósseis.

4. Apresentação dos resultados

4.1 AICV método IPCC

Os resultados apresentados na Tabela 3 foram produzidos utilizando a abordagem do IPCC, permitindo a observação das emissões de Gases de Efeito Estufa – GEE em kg CO₂ equivalentes.

Foi evidenciado a partir da Tabela 3 que a coleta anual resulta em uma emissão total de 61,1689 kg de CO₂ equivalente, com a maior parcela sendo proveniente da rota entre Sarandi e Curitiba (representando 92% do total).

Categoria de impacto	de	Unidade	Total	Jandaia do Sul à Mandaguari	Mandaguari à Sarandi	Sarandi à Curitiba
IPCC	GWP	kg CO ₂ eq.*	61,1689	1,598038627	3,992201356	55,57865831
		100a				

* kg CO₂ eq. – Quilo de CO₂ equivalente

Tabela 3 - Total de emissões de GEE do transporte dos REE, método IPCC

4.2 AICV método ReCiPe

Os resultados referentes à caracterização do impacto, que de maneira quantitativa ilustra o efeito de cada etapa, categoria e o impacto global causado pelo ACV em cada categoria, gerados a partir da metodologia ReCiPe.

A Tabela 4 apresenta a caracterização global das fases de transporte dos eletroeletrônicos entre as cidades, utilizando o método ReCiPe.

Categoria de impacto	Unidade	Total	Transporte de Jandaia do Sul à Mandaguari	Transporte de Mandaguari à Sarandi	Transporte de Sarandi à Curitiba
Aquecimento global (saúde humana)	DALY*	6,74E-05	1,74E-06	4,39E-06	6,12E-05



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

Destruição do ozônio estratosférico	DALY	1,53E-08	3,95E-10	9,95E-10	1,39E-08
Radiação ionizante	DALY	5,56E-09	1,47E-10	3,65E-10	5,05E-09
Formação de ozônio (saúde humana)	DALY	6,52E-07	1,68E-08	4,25E-08	5,93E-07
Formação de material particulado fino	DALY	9,54E-05	2,47E-06	6,22E-06	8,67E-05
Toxicidade humana cancerígena	DALY	7,63E-07	2,16E-08	5,13E-08	6,9E-07
Toxicidade humana não cancerígena	DALY	8,43E-06	2,2E-07	5,51E-07	7,66E-06
Consumo de água (saúde humana)	DALY	-1,7E-09	2,81E-11	-5E-11	-1,7E-09
Aquecimento global (ecossistema terrestre)	espécies.ano**	2,03E-07	5,26E-09	1,32E-08	1,85E-07
Aquecimento global (ecossistema aquático)	espécies.ano	5,55E-12	1,44E-13	3,62E-13	5,05E-12
Formação de ozônio (ecossistema terrestre)	espécies.ano	9,32E-08	2,41E-09	6,07E-09	8,47E-08
Acidificação terrestre	espécies.ano	7,17E-08	1,85E-09	4,67E-09	6,52E-08
Eutrofização da água doce	espécies.ano	5,81E-10	1,65E-11	3,91E-11	5,26E-10
Eutrofização da água marinha	espécies.ano	1,48E-13	4,13E-15	9,93E-15	1,34E-13
Ecotoxicidade terrestre	espécies.ano	2,88E-08	7,43E-10	1,88E-09	2,62E-08
Ecotoxicidade água doce	espécies.ano	3,58E-10	9,62E-12	2,36E-11	3,25E-10
Ecotoxicidade água marinha	espécies.ano	2,09E-10	5,47E-12	1,37E-11	1,9E-10
Uso de terra	espécies.ano	1,14E-09	5,1E-11	9,3E-11	9,95E-10
Consumo de água (ecossistema terrestre)	espécies.ano	2,77E-10	7,63E-12	1,85E-11	2,51E-10
Consumo de água (ecossistema aquático)	espécies.ano	3,59E-13	9,3E-15	2,34E-14	3,26E-13
Escassez de recursos mineral	\$***	0,005841	0,000171	0,000398	0,005272
Escassez de recurso fóssil	\$	10,63338	0,275228	0,693201	9,66495

* DALY - *Disability Adjusted Life Years* - Anos de vida perdidos ajustados por incapacidade

** Espécies.ano – Mortalidade espécies anos

*** (\$) USD – unidades de valor de recursos (em dólar)

Tabela 4 – Caracterização da AICV do transporte da coleta de REE - Jandaia à Curitiba - 2019, método RECIPE

Fonte: Autores (2021)

Na Tabela 5, em termos de impacto total, na categoria danos à saúde humana, é possível observar que as categorias mais afetadas são a formação de material particulado e o aquecimento global, já na categoria de danos aos ecossistemas, os mais afetados são aquecimento global nos ecossistemas terrestres e formação de ozônio; e na categoria de uso de recursos naturais, e a categoria de recursos minerais é a de maior impacto.

4.3 Interpretação dos resultados

A reciclagem é uma estratégia eficaz para gerenciar itens que precisam de uma disposição após serem usados. No entanto, diante do estudo apresentado, ficou evidente que a reciclagem também impacta o meio ambiente, iniciando-se no seu transporte.



Os resultados do estudo mostrou que a etapa de transporte do REE de Jandaia do Sul tem o impacto mais significativo no trecho entre Sarandi e Curitiba, devido à maior distância envolvida. Diante disso, considera-se a necessidade de estabelecer uma empresa que desempenhe o mesmo processo mais próximo da cidade, afim de reduzir o impacto no transporte e assim, minimizar as emissões de gases de efeito estufa, que totalizam 61,1 kg de CO₂ eq, além dos impactos relacionados à emissão de material particulado e ao aquecimento global. Entretanto, a Acaman em Mandaguari evidenciou que nessa última parte do processo é necessário utilizar algumas máquinas e equipamentos de reciclagem e que são mais complexos, dificultando a aplicação em empresas familiares, como é o caso. Além disso, o estudo também evidenciou que após o transporte dos REE para Curitiba, muitas das peças de dispositivos de eletroeletrônico são transportados por navios para a Alemanha para serem recicladas e extraídos os minerais.

Anualmente, ocorre a coleta de REE em Jandaia do Sul. No entanto, durante o restante do ano muitas pessoas não sabem em quais locais podem realizar o descarte desse tipo de produto, o que resulta em destinos inadequados e ambientalmente prejudiciais, como em lixões, rios, córregos, ou até mesmo queimados a céu aberto.

Considerando essa situação, uma alternativa seria a implementação de uma coleta trimestral de REE, ou também, a criação de Ecopontos distribuídos pela cidade, oferecendo uma opção para o descarte de REE durante todo o ano. Isso permitiria a destinação adequada dos REE, que muitas vezes são encontrados em locais que representam riscos para a saúde humana e os ecossistemas.

5. Considerações finais

O objetivo deste estudo foi avaliar os impactos ambientais gerados pelo transporte na coleta de eletroeletrônicos no ano 2019, na junção de vários atores, o município, pelo grupo Práticas Ambientais Sustentáveis da UFPR em Jandaia do Sul e empresa de coleta e recolagem. Através dos dados obtidos, foi possível analisar as quantidades para posteriormente calcular os efeitos dos impactos gerados pelo transporte do REE com destino à reciclagem.

O processo de reciclagem dos REE em Jandaia do Sul segue um fluxo que envolve várias cidades, sendo: os REE colatados na cidade são encaminhados para Mandaguari e, a partir daí, direcionados para Sarandi e, por fim, para Curitiba, onde ocorre o processo de reciclagem. A análise foi conduzida por meio de três métodos distintos: IPCC, ReCiPe e Demanda de energia Acumulada.

Os resultados indicaram que o transporte dos eletroeletrônicos de Jandaia do Sul até o ponto de reciclagem em Curitiba resultou na emissão total de 61,1689 kg CO₂ eq de Gases de Efeito Estufa, além de uma demanda considerável de energia proveniente de energias fósseis e nucleares. Esses dados quantitativos relativos aos impactos, impactos ambientais devem ser levados em consideração ao avaliar o ciclo de vida completo de um processo de reciclagem de dispositivos eletroeletrônicos.

Ao utilizar o método ReCiPe para avaliar os impactos, os resultados indicaram que o transporte dos eletroeletrônicos em Jandaia do Sul tem maior relevância nas categorias: consumo de recursos fósseis e recursos minerais; aquecimento global e formação de ozônio nos ecossistemas; aquecimento global relacionado à saúde humana;



e emissão de material particulado para o ar. Todas essas categorias de impacto estão diretamente associadas às rotas de transporte percorridas durante o processo de reciclagem.

Através desse estudo, foi possível observar que, existem implicações ambientais na fase de transporte da logística reversa. O inventário do ciclo de vida do transporte dos REE poderá ser unido a outros estudos de ACV e modelo de economia circular para que se tenha um refinamento das análises, contribuindo para uma melhor concepção dos impactos gerados em todo o ciclo de vida dos equipamentos eletroeletrônicos.

O estudo foi limitado devido à situação global causada pela pandemia de COVID-19, que resultou em paralisações. Inicialmente, o escopo abrangia a análise de todo o processo de reciclagem, desde a pré-reciclagem até a reciclagem final. No entanto, devido a pandemia, as visitas técnicas ficaram limitadas, impactando a extensão e abrangência da pesquisa.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO14040**: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14044**: gestão ambiental – avaliação do ciclo de vida – requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009.

Andrade, SG, 2013. Entraves e Obstáculos da Logística Reversa de Lâmpadas Mercuriais no Brasil (Dissertação de mestrado). Fundação Oswaldo Cruz. Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, Brasil.

BALDÉ, C.P., FORTI V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P. **The Global E-waste Monitor – 2017**.

United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.

BLENGINI, G. A. et al. Life Cycle Assessment guidelines for the sustainable production and recycling of aggregates: The Sustainable Aggregates Resource Management project (SARMa). In: **Journal of Cleaner Production**, 27, 177-181, may 2012. Disponível em <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84857446181&origin=inward&txGid=dc1a20809926d8b474fb43458fe4529a>. Acesso em: ago. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.01.020>

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 de ago. 2010.

Brasil, 2010. Política nacional de resíduos sólidos – lei no 12.305. 2 de agosto de 2010. (em português). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm acessado, 2019.

Brasil, 2010a. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. (Em português). http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm, Data de acesso: novembro de 2018.



Baxter, J., Lyng, K.-A., Askham, C., Hanssen, O.J., 2016. High-quality collection and disposal of WEEE: environmental impacts and resultant issues. *Waste Manag.* 57, 17e26

Chaves, GLD, Batalha, MO, 2006. Os consumidores valorizam a coleta de embalagens recicláveis? Um estudo de caso da logística reversa em uma rede de hipermercados. *Gestão Produção* 13, 423–434. <https://doi.org/10.1590/S0104-530X2006000300006>.

Dat, LQ, Linh, DTT, Chou, SY, Yu, VF, 2012. Otimizando custos de logística reversa para reciclagem de produtos elétricos e eletrônicos em fim de vida. *Especialista Sist. Appl.* 39, 6380–6387. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.12.031>.

Eu-Jrc, 2018. Guia de regras de categoria de pegada ambiental de produto (PEF) – versão 6.3 1–238. https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_guidance_v6.3.pdf (acessado, 2019). União Europeia, 2002a. Diretiva 2002/96/CE do Parlamento Europeu e da Conselho sobre Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (WEEE). *Desligado. J. Eur. União* 13, 1–24. https://doi.org/10.3000/19770677.L_2012.197.eng, 2019.

EUROPEAN COMMISSION. (2010) **ILCD Handbook**: international reference life cycle data system: general guide for life cycle assessment. Luxemburgo: Publications Office of the European Union. 417p.

Forti, V., Balde, CP, Kuehr, R., Bel, G., 2020. O Global E-Waste Monitor 2020: Quantidades, Fluxos e o Potencial da Economia Circular.

Islã, M., & Huda, N. (2018). Reverse logistic and closed-loop supply chain of waste electrical and electronic equipment (WEEE)/ E- waste: *A comprehensive literature review. Resources, Conservation and Recycling*, 137, 48-75. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.026>

Kyere et al Contamination and health risk assessment of exposure to heavy metals in soils from informal e-waste recycling site in ghana DOI: <https://doi.org/10.28991/esj-2018-01162>.

Liu, K., Tan, Q., Yu, J., Wang, M., 2023. Uma perspectiva global sobre a reciclagem de lixo eletrônico. *Circ. Econ.*, 100028

Magalhães, M.; Reis, F.; Stein, P.; Benvenuti, T.; Veloso, T. (2021). Panorama geral dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil nos últimos cinco anos. ISBN: 978-65-89908-00-5.

Novi, JC, Oliveira, SVWB, Salgado Junior, AP, Bonacim, CAG, Oliveira, MMB, 2013. Avaliação Legal, Ambiental e Econômica para Implantação de Sistema Privado de Tratamento de Resíduos Biomédicos para Geração de Energia em Hospitais Escolares do Estado de São Paulo. *Desenv. Meio Ambiente* 27, 193–209. <https://doi.org/10.5380/dma.v27i0.28407>.

Sepulveda, A., Schluep, M., Renaud, FG, Streicher, M., Kuehr, R., Hagelueken, C., Gerecke, AC, 2010. Uma revisão do destino ambiental e dos efeitos de substâncias perigosas liberadas de equipamentos elétricos e eletrônicos durante a reciclagem:



exemplos da China e da Índia. *Ambiente. Avaliação de Impacto. Rev.* 30, 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2009.04.001>.

Santos, RE, Santos, IF, Barros, RM, Bernal, AP, 2019. Gerando energia elétrica pelos resíduos sólidos urbanos no Brasil: uma análise comparativa econômica e energética. *J. Environ. Gerenciar* 231, 198–206. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015>.
Savaskan, RC, van Wassenhove, LN, 2009. Incentivos e pro-contratos de compartilhamento de custos de recall de dutos. *Gerenciar ciência* 55, 1122–1138. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1090.1008>.

Sunbal Siddique, Abdullah Siddique. History and Major Types of Pollutants in Electronic Waste Recycling in: *Electronic Waste Pollution*, Muhammad Zaffar Hashmi and Ajit Varma (2019), pp. 1-12.

T.H. Christensen a, A. Damgaard a, J. Levis b, Y. Zhao c, A. Björklund d, U. Arena e, M.A. Barlaz b, V. Starostina f, A. Boldrin a, T.F. Astrup a, V. Bisinella a. Application of LCA modelling in integrated waste management. *Waste Management*. Volume 118, December 2020, Pages 313-322.

UNITED NATIONS. **United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)**. 1992. Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>. Acesso em: 06 set. 2020.

União Europeia, 2002b. Diretiva 2011/65/eu do parlamento europeu e da conselho sobre a restrição do uso de certas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos. *Desligado. J. Eur. União* 54, 88–110. https://doi.org/10.3000/17252555.L_2011.174.eng, 2019.

Vahidi, E., Navarro, J., & Zhao, F. (2016a). An initial life cycle assessment of rare earth oxides production from ion-adsorption clays. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 1–11. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2016.05.006>

Valero Navazo, J.M., Villalba Mendez, G., Talens Peir o, L., 2014. Material flow analysis and energy requirements of mobile phone material recovery processes. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 567e579.

Wager, P.A., Hischer, R., 2015. Life cycle assessment of postconsumer plastics € production from waste electrical and electronic equipment (WEEE) treatment residues in a Central European plastics recycling plant. *Sci. Total Environ.* 529, 158e167.

Zeng, X., Mathews, JA, Li, J., 2018. A mineração urbana de lixo eletrônico está se tornando mais cara e eficaz do que a mineração virgem. *Ambiente. ciência Tecnol.* 52 (8), 4835–4841.

Zhang, YM, Huang, GH, He, L., 2011. Um modelo inexato de logística reversa para municípios

sistemas de gestão de resíduos sólidos. *J. Environ. Gerenciar* 92, 522-530. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.011>.

10.1016/j.jenvman.2010.09.011.



MAPEAMENTO SISTEMÁTICO DA RECUPERAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE METAIS EM SMARTPHONES PÓS- CONSUMO

Aline Deitos^{1*}; Emanuele Caroline Araujo dos Santos²; Regina Célia Espinosa
Modolo³; Feliciane Andrade Brehm⁴; Carlos Alberto Mendes Moraes⁵
^{1, 2, 3, 4, 5} Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS
*aline.deitos@gmail.com

Resumo

O consumo de equipamentos eletroeletrônicos está cada vez maior e por consequência, um aumento na extração de recursos naturais para a obtenção de metais, como por exemplo, prata, cromo, gálio, cobre, ouro, entre outros, necessários para a produção destes equipamentos, ocasiona escassez desses materiais. Além disso, gera-se um aumento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Um exemplo de REEE são os smartphones e/ou telefones celulares pós-consumo, os quais contém em sua composição diferentes metais, como os críticos, tornando necessário estudos visando a recuperação destes. Assim, o objetivo deste trabalho foi fazer um levantamento dos estudos que têm sido realizados em smartphones e/ou telefones celulares pós-consumo para a recuperação de metais, métodos utilizados para a caracterização e os tipos de metais que estão sendo pesquisados. A metodologia empregada foi o mapeamento sistemático, sendo considerados os trabalhos publicados dos últimos 5 anos, bem como definição das questões gerais e específicas para o processo de busca (string e base de dados). O resultado obtido foi um total de 70 artigos, sendo que 30 artigos responderam à questão geral e destes apenas 16 responderam às questões específicas.

Palavras-chave: Smartphones; Telefones celulares; Recuperação; Caracterização; Metais críticos.

1. Introdução

O desenvolvimento econômico global aliado ao ciclo de vida menor de equipamentos eletroeletrônicos bem como poucas opções para conserto, acarretam um maior consumo destes equipamentos e, conseqüentemente, o aumento da quantidade gerada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). A geração de REEE global no ano de 2019 foi de 53,6 Mt e apenas 17,4% foi reciclado, no Brasil a geração foi de 2,1 Mt (FORTI *et al.*, 2020).

Forti *et al.* (2020) descrevem seis categorias gerais dos equipamentos eletroeletrônicos, em que um deles são os pequenos equipamentos de TI e telecomunicações, os quais fazem parte os telefones celulares incluindo smartphones,



scanners, sistema de posicionamento global (GPS), dentre outros. No ano de 2019 a geração global destes resíduos sólidos foi de 4,7 Mt.

Os smartphones podem conter na sua composição 80% de elementos da tabela periódica e alguns destes metais são fundamentais para o seu desenvolvimento, porém fatores geopolíticos e escassez geológica colocam em risco a sua produção. Os metais presentes em smartphones incluem o índio, lantânio, gálio, níquel, magnésio, lítio, cobalto, neodímio, dentre outros (VENDITTI, 2021).

Os minerais estratégicos definidos para um país podem ser críticos para outros, sendo necessários estudos nacionais para identificá-los como críticos bem como suas respectivas cadeias produtivas (IPEA, 2022).

A Comissão Europeia (2017) definiu como matéria-prima crítica toda aquela que possui um alto risco de abastecimento e de grande importância econômica. A partir desses dois parâmetros e quando estes são atingidos ou excedidos, é estipulada uma lista das matérias-primas críticas. No ano de 2020 a Comissão Europeia apresentou um estudo relacionando 30 matérias-primas como críticas, como por exemplo, bauxita, gálio, nióbio, vanádio, magnésio, índio, lítio, etc (COMISSÃO EUROPEIA, 2020).

Esta lista também tem como intuito estimular a produção europeia de matérias-primas críticas por meio da reciclagem e de novas atividades de mineração (COMISSÃO EUROPEIA, 2020).

Devido ao aumento de 60% da extração de recursos naturais nas últimas duas décadas e que por sua vez provoca a escassez de metais necessários para a produção dos equipamentos, faz-se necessário novos modelos de negócio e projetos que considerem princípios da economia circular, recuperando valor para toda a cadeia produtiva (ABINEE, 2017).

A mineração urbana vai ao encontro dos princípios da economia circular uma vez que foca no aproveitamento econômico de matérias-primas secundárias obtidas de produtos e materiais pós-consumo. O objetivo da mineração urbana está pautado em utilizar ao máximo os materiais com custo mínimo de produção e processamento, simultaneamente com a diminuição dos impactos ambientais decorrente da destinação inadequada dos REEEs. Os estoques de REEE estão localizados nas cidades, especificamente em aterros sanitários, domicílios e edifícios, sendo denominados de minas urbanas (GIESE *et al.*, 2021).

O processo de mineração urbana apresenta etapas para a obtenção de metais que envolvem a desmontagem dos componentes, processamento físico (separação gravimétrica, magnética e eletrostática) e processos metalúrgicos como a pirometalurgia, hidrometalurgia e biolixiviação (GIESE *et al.*, 2021).

Visto a importância da recuperação de metais presentes em REEE para a reciclagem destes, faz-se necessário buscar alternativas tecnológicas. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi fazer um levantamento dos estudos que têm sido realizados em smartphones e/ou telefones celulares pós-consumo para a recuperação de metais, métodos utilizados para a caracterização e os tipos de metais que estão sendo pesquisados.

2. Metodologia



O mapeamento sistemático foi desenvolvido em quatro etapas, sendo elas: definição das questões de pesquisa, definições para o processo de busca, triagem e geração dos resultados, conforme fluxograma apresentado na Figura 1.



Figura 1 – Fluxograma das etapas do mapeamento sistemático

Fonte: AUTOR, 2023.

A primeira etapa consistiu em estabelecer as questões de pesquisa a partir do objetivo deste trabalho, ou seja, verificar os estudos existentes de REEEs e principalmente smartphones ou telefones celulares pós-consumo visando a recuperação de metais, entender quais metais têm sido investigados bem como métodos utilizados para a caracterização deste tipo de resíduo. Sendo assim, dividiu-se as questões em geral e específicas apresentadas no Quadro 1.

Definição das questões de pesquisa	
Questão Geral (QG)	Quais estudos estão relacionados aos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos visando a recuperação de metais?
Questão Específica 1 (QE1)	Quais são os métodos utilizados para a caracterização de telefones celulares ou <i>smartphones</i> pós consumo para a recuperação de metais?
Questão Específica 2 (QE2)	Quais metais têm sido investigados/pesquisados visando sua recuperação de telefones celulares ou <i>smartphones</i> pós consumo?

Quadro 1 – Definição das questões de pesquisa geral e específicas

Fonte: AUTOR, 2023.

Após isso, realizou-se o processo de busca definindo as strings em inglês bem como sinônimos, considerando as seguintes palavras: *mobile phones, smartphones, recovery, recycling, critical metals, strategic metals*. Essas palavras foram inseridas na base de dados Periódicos CAPES através do acesso de aluno da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) da seguinte maneira: (mobile phones OR smartphones) AND (recovery OR recycling) AND (critical metals OR strategic metals).

A próxima etapa desenvolvida foi a triagem que consistiu na definição dos critérios de exclusão e inclusão e posteriormente a seleção dos artigos. Os critérios empregados foram:

- Critério de Exclusão:
 - Estudos anteriores ao ano de 2018;
 - Estudo publicado na forma de teses/dissertações, artigos de congresso;



- Estudos não publicados em inglês.
- Critério de Inclusão:
 - Apenas estudos de artigos;
 - Apenas estudos no idioma inglês.

Depois da inserção dos critérios de exclusão e inclusão na base de dados de pesquisa, fez-se a seleção dos artigos através da análise do título e resumo para verificar se atendiam a QG. Os artigos que atenderam a QG foram avaliados para as QE1 e QE2.

Cabe destacar que durante a etapa de avaliação da questão geral também se excluíram artigos que abordassem revisão sistemática, estudo com baterias de celulares ou de lítio e o neodímio.

A etapa final do mapeamento sistemático compreende na geração dos resultados a partir das análises acima realizadas bem como a estruturação dos dados obtidos.

3. Resultados

A etapa do processo de busca que utilizou a base de dados Periódicos CAPES empregando a string e os critérios de inclusão e exclusão resultou num total de 70 artigos. O título e resumo destes artigos foram avaliados quanto à QG.

Deste modo, 30 artigos responderam à QG, ou seja, referem-se a estudos que visam de alguma forma a recuperação de metais em REEEs, abordando, por exemplo, diferentes metodologias para a recuperação de metais, caracterização química, processo de desmontagem, trituração/moagem, separação magnética e digestão das amostras.

Os 30 artigos selecionados na etapa acima foram avaliados para as QE1 e QE2 e a partir da leitura destes artigos observou-se que 16 artigos responderam a QE1 e QE2. Esse fato se deve uma vez que as questões específicas estão relacionadas apenas a *smartphones* ou telefones celulares pós-consumo, em que os 14 artigos que não atenderam as QE1 e QE2 abordavam outros tipos de resíduos eletrônicos, como por exemplo, computador, placa de circuito impresso sem especificar a origem do eletrônico, lâmpada LED e telas de monitores LCD obsoletos.

A Figura 2 apresenta um resumo do resultado do mapeamento sistemático aplicado neste trabalho.

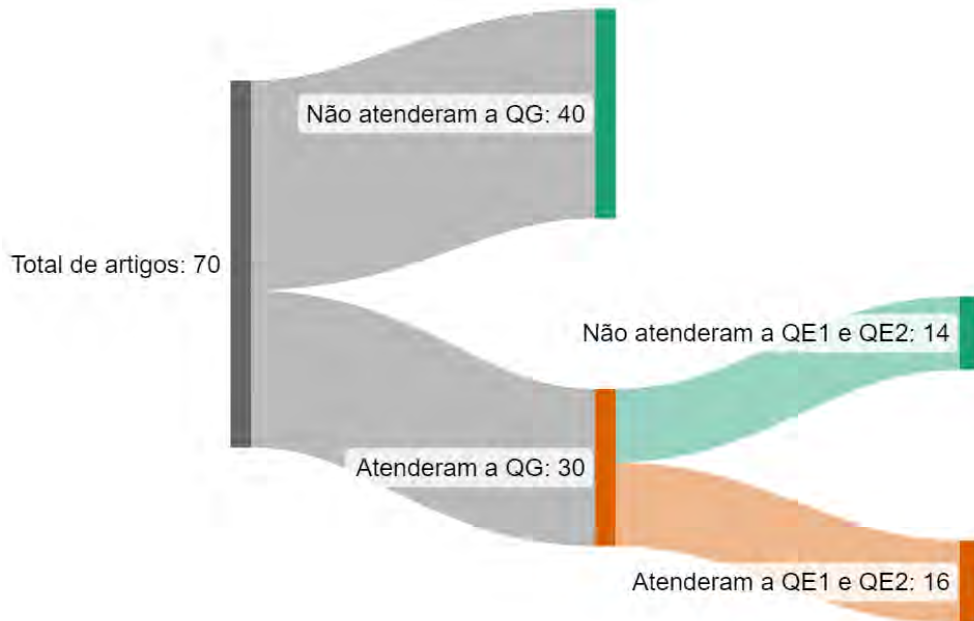


Figura 2 – Resultado do mapeamento sistemático contendo o processo de busca e seleção dos artigos
Fonte: AUTOR, 2023.

Ainda quanto a avaliação dos 16 artigos, percebeu-se que, em relação a QE1, os métodos utilizados para a caracterização são a Espectrometria de Emissão Óptica de Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES), Espectrofotometria de Absorção Atômica, Espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS), Microscopia eletrônica de varredura (MEV), Difração de Raios X (DRX), dentre outras. Porém a caracterização mais empregada foi a ICP-OES.

Cabe destacar que esses estudos também abordam sobre a desmontagem dos *smartphones* e/ou telefones celulares, uso de moinhos para a trituração, comparação da digestão da amostra para realizar a caracterização elementar utilizando diferentes metodologias.

Em relação a QE2, os metais que têm sido investigados/pesquisados em *smartphones* e/ou telefones celulares pós consumo são o cobre, ouro, alumínio, ferro, paládio, gálio, neodímio, cromo, chumbo, dentre outros. O Quadro 2 apresenta os 16 artigos com as respectivas respostas para as QE1 e QE2.

Autor e Ano	QE1: Quais os métodos utilizados para a caracterização de <i>smartphones</i> ou telefones celulares pós-consumo para a recuperação de metais?	QE2: Quais metais têm sido investigados/pesquisados em <i>smartphones</i> ou telefones celulares pós-consumo visando sua recuperação?
Sahan <i>et al.</i> (2019)	- Análise por ICP-OES	Cobre (Cu), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Estanho (Sn), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Cromo (Cr), Chumbo (Pb), Cobalto



Autor e Ano	QE1: Quais os métodos utilizados para a caracterização de <i>smartphones</i> ou telefones celulares pós-consumo para a recuperação de metais?	QE2: Quais metais têm sido investigados/pesquisados em <i>smartphones</i> ou telefones celulares pós-consumo visando sua recuperação?
		(Co); Prata (Ag), Ouro (Au), Paládio (Pd), Platina (Pt)
Flerus e Friedrich (2020)	- Análise por ICP-OES; - Medição de carbono elementar, carbono inorgânico e carbono orgânico	Ag, Al, Arsênio (As), Au, Cu, Disprósio (Dy), Fe, Gálio (Ga), Neodímio (Nd), Silício (Si), Sn, Zn
Tantawi e Hua (2021)	- Análise por ICP-OES	Berílio (Be), Sc, Cádmio (Cd), Lantânio (La), Nd, Európio (Eu), Gadolínio (Gd), Túlio (Tm), Itérbio (Yb), Lutécio (Lu), Lítio (Li), Vanádio (V), Ga, Ródio (Ru), Índio (In), Iridio (Ir), Bismuto (Bi), Samário (Sm), Dy, Urânio (U), Magnésio (Mg), Estrôncio (Sr), Co, Germânio (Ge), As, Zircônio (Zr), Nióbio (Nb), Molibdênio (Mo), Pd, Ag, Antimônio (Sb), Háfnio (Hf), Tungstênio (W), Au, Pb, Titânio (Ti), Manganês (Mn), Boro (B), Al, Bário (Ba), Tântalo (Ta), Pt, Cr, Ni, Zn, Sn, Fe, Cu
Andrade <i>et al.</i> (2022) ^a	- Dados de diferentes autores no uso de técnicas analíticas como ICP-OES, ICP-MS.	Apresenta informações de diferentes autores quanto ao Cu, Au, In, Ag, Zn, etc.
Andrade <i>et al.</i> (2022) ^b	- MEV com energia dispersiva espectroscopia de raios X - Perda de ignição - Análise de ICP-OES - DRX e espectrometria de Absorção Atômica de Chama (FAAS)	Ag, Au, Cálcio (Ca), Co, Cr, Mg, Mn, Sódio (Na), Ni, Sn e Zn.
Buechler <i>et al.</i> (2020)	- Análise por ICP-OES - Espectroscopia de fotoelétrons de raios X (XPS)	Cério (Ce), Dy, Eu, Gd, Lutécio (Lu), Nd, Pr, Sc, Sm, Itérbio (Yb), Ir, Pd, Pt, Al, As, Be, Bismuto (Bi), Co, Cr, Ga, Mn, Sb, Sn, Sr, Telúrio (Te), V, Zr, Ag, Au, B, Ba, Cd, Cu, Fe, Hf, Mo, Ni, Pb, Si, Th, Zn
Park, Han, Park (2019)	- Análise por ICP-OES	Cu, Al, Ni, Au, Ag, Sn, Pd
Tunali, Tunali, Yenigun (2020)	- Análise por ICP-OES	Cu, F, Ni, Al, Zn, Pb, Cr, Mn, Co, Mo, Cd, Nobélio, Ag, Au, Praseodímio (Pr), Dy, Pt, La, Ce.



Autor e Ano	QE1: Quais os métodos utilizados para a caracterização de <i>smartphones</i> ou telefones celulares pós-consumo para a recuperação de metais?	QE2: Quais metais têm sido investigados/pesquisados em <i>smartphones</i> ou telefones celulares pós-consumo visando sua recuperação?
Marra, Cesaro e Belgiorno (2019)	- Análise por ICP-OES	Al, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Ag, Au, Pd, Pt, Ce, Eu, La, Nd, Y (adaptado de Marra <i>et al.</i> 2018)
Isildar <i>et al.</i> (2018)	- Análise por ICP-OES, ICP-MS, espectrofotometria de absorção atômica	Apresenta uma tabela com diferentes autores que investigaram Au, Cu, Al, Cu, Ga, Ti, Se, In, Te, entre outros.
Pourhossein <i>et al.</i> (2021)	- Análise por ICP-OES - DRX - Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) - MEV	Sr e In
Pietrellia, Ferrob e Vocciantec (2019)	- Analisadas por absorção atômica	Ag, Al, Au, Cd, Cr, Co, Fe, Mn, Ni, Pb, Pd, Pt, Zn, etc.
Rao <i>et al.</i> (2021)	- Análise por ICP-OES	Cu, Ouro, Ag, Sn, Fe, Pd, Ni, Zn, Pb, Cd
Nasiri <i>et al.</i> (2022)	- Análise por ICP-MS - Análise da amostra biolixiviada por SEM	Al, Cr, Cu, Ni, Sn, Zn
Doidge <i>et al.</i> (2019)	- Análise por ICP-OES - Cristalografia de raio-X	Cu, Al, Zn, Ni, Fe, Sn, Au
Remeteiová <i>et al.</i> (2020)	- Espectrometria de absorção atômica de chama de fonte contínua de alta resolução (HR CS FAAS); - MEV e espectroscopia de raios X de energia dispersiva (EDX)	Cu, Fe, Ni, Pb e Zn

Quadro 2 – Artigos que atenderam/responderam as questões específicas 1 e 2**Fonte:** AUTOR, 2023.

Verificou-se que dos 16 artigos avaliados, vide Quadro acima, apenas 2 artigos abordaram especificamente referências de outros autores quanto aos tipos de metodologias para recuperação de metais, vantagens e desvantagens destes métodos e análise de caracterização de elementos, cujos os trabalhos foram publicados por Isildar *et al.* (2018) e Andrade *et al.* (2022)^a.

Isildar *et al.* (2018) mencionaram que para a recuperação de metais dos REEEs utilizando as técnicas como a pirometalurgia, hidrometalurgia e biometalurgia existem impactos ambientais associados a elas. Por exemplo, a pirometalurgia possui alto impacto em função das emissões gasosas, já a hidrometalurgia possui impacto ambiental médio utilizando produtos químicos e a biometalurgia com baixo impacto ambiental. (ISILDAR *et al.*, 2018).

Andrade *et al.* (2022)^a apresentaram algumas vantagens e desvantagens das técnicas referenciando outros autores como o alto consumo de energia para a



pirometalurgia e recuperação de quase todos os metais, hidrometalurgia com a geração de resíduos e alta taxa de recuperação de metais e biolixiviação com baixa taxa de recuperação e alta seletividade uma vez que algum microrganismo trata um metal específico.

No artigo de Isildar *et al.* (2018) é mencionado que para recuperar metais de REEE a hidrometalurgia e a biohidrometalurgia possibilitam um processamento ecologicamente correto e econômico, bem como seletivo para metais.

Além disso, com a avaliação dos 16 artigos quanto a QE1 e QE2, fez-se uma seleção de alguns dos autores quanto aos resultados obtidos na caracterização elementar dos *smartphones* e/ou telefones celulares pós consumo utilizando a ICP-OES, vide Tabela 1.

Percebe-se que a maior concentração de metal é o Cu e com a presença de outros metais como Fe, Ni, Zn, Sn, Al, dentre outros. Esses resultados e suas comparações devem ser avaliados em detalhe, pois as variações dos resultados de concentração dos metais podem ocorrer, uma vez que cada pesquisa emprega processos diferentes, como separação das partes dos *smartphones* e/ou telefones celulares pós consumo, trituração, preparação da amostra quanto ao tipo de digestão ácida utilizada.

Metais	Autor e Ano					
	Sahan <i>et al.</i> (2019)	Flerus e Friedrich (2020)	Rao <i>et al.</i> (2021)	Buechler <i>et al.</i> (2020)	Marra, Cesaro e Belgiorno (2019)*	Andrade <i>et al.</i> ^b (2022)
Al	0,89 - 2,01%	5,82%	-	31.495 mg/kg	31.797 mg/kg	300 - 1200 mg/kg
Cd	-	-	0,10%	0,55 mg/kg	236 mg/kg	-
Co	0,01-0,07%	-	-	140 mg/kg	-	200 - 500 mg/kg
Cr	0,01 - 1,5%	-	-	2415 mg/kg	-	100 - 50000 mg/kg
Cu	20,6 - 45,1%	5,06%	42,73%	116.503 mg/kg	33501 mg/kg	217800 - 560300 mg/kg
Fe	0,5 - 4,84%	2,48%	0,32%	23.418 mg/kg	16.003 mg/kg	500 - 267600 mg/kg
Pb	0,10-2,73%	-	0,08%	239 mg/kg	22.100 mg/kg	-
Ni	1,10-5,93%	-	0,40%	9287 mg/kg	1294 mg/kg	7100 - 45600 mg/kg
Zn	0,23-6,7%	0,28%	0,23%	5701 mg/kg	8202 mg/kg	2900 - 10100 mg/kg
Sn	1,3-6,27%	1,37%	1,33%	10.874 mg/kg	-	14700 - 29600 mg/kg
Ag	0,17-0,83%	0,14%	0,08%	411 mg/kg	271 mg/kg	<100 - 2300 mg/kg
Au	0,02-0,29%	325 ppm	0,0013 %	806 mg/kg	8,7 mg/kg	-
Pd	0,001-0,08%	-	0,003%	6215 mg/kg	23 mg/kg	-



Metais	Autor e Ano					
	Sahan <i>et al.</i> (2019)	Flerus e Friedrich (2020)	Rao <i>et al.</i> (2021)	Buechler <i>et al.</i> (2020)	Marra, Cesaro e Belgiorno (2019)*	Andrade <i>et al.</i> ^b (2022)
Pt	0,001-0,005%	-	-	7257 mg/kg	< 1,3 mg/kg	-
As	-	19 ppm	-	43,84 mg/kg	-	-
Dy	-	306 ppm	-	86,39 mg/kg	-	-
Ga	-	116 ppm	-	35,46 mg/kg	-	-
Nd	-	0,56%	-	1372 mg/kg	88 mg/kg	-
Si	-	19,85%	-	3624 mg/kg	-	-

* adaptado de Marra *et al.* (2018)

Tabela 1 – Seleção de artigos que empregaram a análise de ICP-OES e resultado da concentração dos metais

Fonte: AUTOR, 2023.

Outra avaliação realizada destes artigos foi que alguns autores apresentaram a recuperação de metais, como ouro, cobre, gálio, índio, estrôncio utilizando processos como a hidrometalurgia, biohidrometalurgia e pirometalurgia, conforme apresentado no Quadro 3.

Autor e Ano	Metodologia aplicada para a recuperação de metal	Metal recuperado
Flerus e Friedrich (2020)	Hidrometalurgia <i>*O resíduo smartphone utilizado para o processo hidrometalúrgico já passou por um processo de pirólise.</i>	Ga
Andrade <i>et al.</i> (2022)	Biohidrometalurgia - biolixiviação utilizando bactéria <i>A. ferrooxidans</i>	Cu
Park, Han, Park (2019)	Pirólise, tratamento físico e processamento pirometalúrgico	Au, Ag, Ni e Sn
Marra, Cesaro e Belgiorno (2019)	Hidrometalurgia	Al, Cd, Cu, Fe, Ni, Pb, Zn, Ce, Eu, La, Nd, Y, Ag, Au, Pd
Pourhossein <i>et al.</i> (2021)	Biohidrometalurgia - biolixiviação utilizando bactérias acidófilas adaptadas	In e Sr
Rao <i>et al.</i> (2021)	Hidrometalurgia	Cu e Au
Nasiri <i>et al.</i> (2022)	Biohidrometalurgia - bactérias heterotróficas acidófilas	Al, Cr, Cu, Ni, Sn, Zn
Doidge <i>et al.</i> (2019)	Hidrometalurgia	Au

Quadro 3 – Seleção dos artigos que recuperaram metais e respectiva metodologia empregada

Fonte: AUTOR, 2023.



5. Considerações Finais

Com o mapeamento sistemático realizado para os últimos 5 anos de estudos e utilizando o processo de busca estipulado neste trabalho, percebe-se a importância da preparação da amostra para a caracterização química e uso das técnicas analíticas para os REEEs em especial os smartphones ou telefones celulares pós-consumo.

Além disso, respondendo ao QE1 quanto aos métodos utilizados para a caracterização de smartphones ou telefones celulares pós-consumo visando a recuperação de metais identificou-se que a principal análise empregada é a espectrometria de emissão óptica de plasma acoplado indutivamente (ICP-OES).

Em resposta à QE2, constatou-se que os metais que têm sido investigados/pesquisados em smartphones ou celulares pós-consumo são o ouro e cobre, bem como técnicas para sua recuperação. Além disso, destaca-se que os principais processos utilizados para a recuperação de metais dos trabalhos analisados foram a hidrometalurgia ou biohidrometalurgia.

Sabendo que esse tipo de resíduo sólido é composto por diferentes metais e muitos são classificados como críticos e essenciais para a sua produção, são necessários mais estudos que realizam a recuperação de outros metais, como por exemplo o gálio e índio, por exemplo, bem como avaliar o tipo de processo a ser utilizado levando em consideração questões ambientais e econômicas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e CAPES pelas bolsas de DTI dos pesquisadores, doutorado, e de Pesquisadores em Desenvolvimento Tecnológico e Extensão Inovadora – DT2.

Referências

ANDRADE, Daniel Fernandes *et al.*^a Analytical and reclamation technologies for identification and recycling of precious materials from waste computer and mobile phones. **Chemosphere**. v. 286, 2022. (DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.131739).

ANDRADE, Lidiane Maria *et al.*^b Copper recovery through biohydrometallurgy route: chemical and physical characterization of magnetic (m), non-magnetic (nm) and mix samples from obsolete smartphones. **Bioprocess and Biosystems Engineering**. 2022. (DOI: 10.1007/s00449-022-02775-z).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). **A INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA IMPULSIONANDO A ECONOMIA VERDE E A SUSTENTABILIDADE**. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/fasci17.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2023.

BUECHLER, Dylan T. *et al.* Comprehensive elemental analysis of consumer electronic devices: Rare earth, precious, and critical elements. **Waste Management**. V. 103, 2020. (DOI: 10.1016/j.wasman.2019.12.014).



COMISSÃO EUROPEIA. **Study on the review of the list of Critical Raw Materials Final Report**. European Commission, Luxembourg, 2017. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdab5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en%3E>. Acesso em: 05 jun. 2023.

COMISSÃO EUROPEIA. **Study on the EU's list of Critical Raw Materials (2020) Final Report**. European Commission, Luxembourg, 2020. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/c0d5292a-ee54-11ea-991b-01aa75ed71a1/language-en>. Acesso em: 05 jun. 2023.

DOIDGE, Euan *et al.* Evaluation of Simple Amides in the Selective Recovery of Gold from Secondary Sources by Solvent Extraction. **ACS Sustainable Chem. Eng.** v. 7, 17, p. 15019–15029, 2019. (DOI: <https://doi-org.ez101.periodicos.capes.gov.br/10.1021/acssuschemeng.9b03436>).

FLERUS, Benedikt; FRIEDRICH, Bernd. Recovery of Gallium from Smartphones—Part II: Oxidative Alkaline Pressure Leaching of Gallium from Pyrolysis Residue. **Metals**. v. 10 (12), p. 1565, 2020. (DOI: [10.3390/met10121565](https://doi.org/10.3390/met10121565)).

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis Peter; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/gem-2020/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

GIESE, Ellen Cristine *et al.* **Mineração urbana e cooperativismo: uma abordagem sobre a reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro, CETEM, 2021. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2395>. Acesso em: 10 jun. 2023.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). **MINERAIS ESTRATÉGICOS E CRÍTICOS: UMA VISÃO INTERNACIONAL E DA POLÍTICA MINERAL BRASILEIRA**. 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11197/1/td_2768.pdf. Acesso em: 20 jun. 2023.

ISILDAR, Arda *et al.* Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery technologies. **Resources, Conservation & Recycling**. V. 135, p. 296-312, 2018. (DOI: [10.1016/j.resconrec.2017.07.031](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.031)).

TANTAWI, Omae; HUA, Inez. Temporal evolution of metallic element composition and environmental impact in consumer electronic devices: A study of smartphones. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 175, 2021. (DOI: [10.1016/j.resconrec.2021.105886](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105886)).

MARRA, Alessandra; CESARO, Alessandra; BELGIORNO, Vincenzo. Recovery opportunities of valuable and critical elements from WEEE treatment residues by



hydrometallurgical processes. **Environmental Science and Pollution Research**. V. 19, p. 19897-19905, 2019. (DOI:10.1007/s11356-019-05406-5).

NASIRI, Tannaz *et al.* Remediation of metals and plastic from e-waste by iron mine indigenous acidophilic bacteria. **Waste Management & Research**. V. 41(4), p. 894–902, 2022. (DOI: 10.1177/0734242x221126418).

PARK, Hyun Sik; HAN, Yun Soon; PARK, Joo Hyun. Massive Recycling of Waste Mobile Phones: Pyrolysis, Physical Treatment, and Pyrometallurgical Processing of Insoluble Residue. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**. V. 7, p. 14119-14125, 2019. (DOI: 10.1021/acssuschemeng.9b02725).

PIETRELLI, Loris *et al.* Eco-friendly and cost-effective strategies for metals recovery from printed circuit boards. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. V. 112, p. 317-323, 2019. (DOI: 10.1016/j.rser.2019.05.055).

POURHOSSEIN, Fatemeh *et al.* Bioleaching of critical metals from waste OLED touch screens using adapted acidophilic bacteria. **Journal of Environmental Health Science and Engineering**. V.19, p. 893–906, 2021. (DOI: 10.1007/s40201-021-00657-2).

RAO, Mudila Dhanunjaya *et al.* Recycling copper and gold from e-waste by a two-stage leaching and solvent extraction process. **Separation and Purification Technology**. V. 263, p. 118400, 2021. (DOI: 10.1016/j.seppur.2021.118400).

REMETEIOVÁ, Dagmar *et al.* Evaluation of US EPA Method 3052 Microwave Acid Digestion for Quantification of Majority Metals in Waste Printed Circuit Boards. **Metals**. V. 10 (11), p. 1511, 2020. (DOI: 10.3390/met10111511).

SAHAN, Merve *et al.* Determination of Metal Content of Waste Mobile Phones and Estimation of Their Recovery Potential in Turkey. **International Journal of Environmental Research and Public Health**. v. 16(5), p. 887, 2019. (DOI: 10.3390/ijerph16050887)

TUNALI, Merve; TUNALI, Mehmet Meric; YENIGUN, Orhan. Characterization of different types of electronic waste: heavy metal, precious metal and rare earth element content by comparing different digestion methods. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. V. 23, p. 149-157, 2021. (DOI: 10.1007/s10163-020-01108-0).

VENDITTI, Bruno. Visualizing the Critical Metals in a Smartphone. 2021. Disponível em: <https://elements.visualcapitalist.com/critical-metals-in-a-smartphone/>. Acesso em 02 de jun. 2023.



METODOLOGIA DE METARRECICLAGEM E INCLUSÃO DIGITAL NO PROJETO UM COMPUTADOR NOTA 10

Luiza Eugenia da Mota Rocha Cirne^{1*}; Gilberlando Gomes da Silva^{2**}; Rafael Ribeiro Moraes^{3***}; Cibelly Maria Araujo Leite^{4****}; Augusto Queiroz de Macedo^{5*****}

^{1, 2, 3 e 4} Grupo de Estudos e Pesquisa em Gestão Integrada de Resíduos – GPRS,
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil;

⁵ Analista de Sistemas da HP. INC.

*luiza.cirne@yahoo.com.br;

**gomes.silva@ufcg.edu.br;

***rafan955@gmail.com;

****cibelly.maria@estudante.ufcg.edu.br;

*****augustoqmacedo@gmail.com

Resumo

As obsolescências programadas e perceptivas são consideradas ferramentas econômicas pois a partir da redução da reparabilidade e vida útil dos equipamentos, proporcionam um considerável aumento no consumo de novos produtos. Diante da ausência de adequação de tecnologias a design de produtos, um grande número de equipamentos é descartado, mesmo apresentando capacidade de reutilização. O diagnóstico de geração e fluxo desses produtos pós-consumo é fundamental para o desenvolvimento de um plano de gestão que integre as iniciativas bem-sucedidas. No ano de 2012 foi iniciado o projeto de extensão - Recuperação física de eletroeletrônicos e inclusão digital de comunidades, constatando-se previamente a existência de alta taxa de retenção de equipamentos junto aos proprietários e em espaços diversos, bem como inúmeras instituições, bibliotecas comunitárias, escolas e outros espaços necessitando de computadores e equipamentos para satisfazer a inclusão digital das comunidades urbanas e rurais. Em 2020, período da pandemia COVID 19, o projeto passou a ser denominado de “Um computador nota 10” objetivando desenvolver metodologia de metarreciclagem de computadores e equipamentos eletroeletrônicos, para posterior destinação aos alunos e professores de escolas públicas do município, no período de isolamento social. A metodologia adotada foi a de recuperação do conteúdo tecnológico contido no objeto, ou metarreciclagem. Os resultados demonstraram 56,67% de taxa de recuperação física e tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos doados ao projeto e que a atuação voluntária dos professores, técnicos e alunos foi imprescindível para obtenção de êxito em todas as etapas do projeto.

Palavras-chave: Eletroeletrônicos; Extensão; Inclusão digital.

1. Introdução



Segundo a Global E-waste, monitor 2017, o Brasil gerou um total de 1,5 milhão de toneladas de lixo eletrônico em 2016. Somos o segundo maior gerador desse tipo de resíduo no continente americano, atrás apenas dos Estados Unidos.

As obsolescências programadas e perceptivas são consideradas ferramentas econômicas pois a partir da redução da reparabilidade e vida útil dos equipamentos, proporcionam um considerável aumento no consumo de novos produtos. A economia linear, se baseia no sistema de produção, consumo e descarte, com prejuízos econômicos, sociais e ambientais.

Diante deste fato e de ausências de adequação de tecnologias a design de produtos, um grande número de equipamentos é descartado e considerado como inservíveis, mesmo apresentando capacidade de reutilização.

De acordo com o Porto Digital (2013) o crescimento do consumo de equipamentos eletroeletrônicos e a geração de resíduos, que por serem potencialmente tóxicos e poluentes, podem revelar-se como um problema socioambiental e compromete a qualidade do meio ambiente e da saúde humana.

Afirma ainda, que o setor de tecnologia da informação e comunicação é um grande consumidor de equipamentos eletroeletrônicos. Cita que as consequências do consumo geram uma grande quantidade de resíduos, que por conterem substâncias tóxicas, precisam de uma destinação ambientalmente correta.

Dentro desse contexto, considerando-se a crescente geração de REE em IES, a sua composição cada vez mais complexa que aliada a falta de conhecimento sobre sua destinação, o diagnóstico de geração e fluxo desses produtos pós-consumo é fundamental para o desenvolvimento de um plano de gestão que integre as iniciativas bem-sucedidas já existentes e experiências acumuladas dentro das instituições, atendendo exigências legais determinadas pela PNRS.

Dessa forma, em 2012 foi iniciado o projeto de extensão da UFCG - Recuperação física de eletroeletrônicos e inclusão digital de comunidades, constatando-se a existência de alta taxa de retenção de equipamentos junto aos proprietários e em espaços diversos, bem como inúmeras instituições, bibliotecas comunitárias, escolas e outros espaços necessitando de computadores e equipamentos para satisfazer a inclusão digital das comunidades urbanas e rurais.

No período de Pandemia a exclusão digital foi revelada de forma acentuada nos espaços educacionais, necessitando diversas e novas formas de interação entre aluno/professor com destaque para a educação à distância-EAD no município de Campina Grande-PB.

Em 2020, a empresa HP.INC buscou iniciativas que atendessem esses objetivos e através de contatos com o projeto de extensão da UFCG, foi celebrado um convênio de cooperação técnica e pedagógica entre a UFCG e a Secretaria de Educação e Cultura do município de Campina Grande - SEDUC/PMCG contando com as instituições apoiadoras HP Inc. e Instituto Alparbatas, visando a ampliação da inclusão digital de alunos e professores das escolas do município.

O projeto foi denominado de “Um computador nota 10”, seguindo os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável –ODS/ Agenda 2030 /Erradicação da Pobreza, Redução das Desigualdades, Educação de Qualidade, Cidades e Comunidades Sustentáveis,



Consumo e Produção Responsáveis, Água Potável e Saneamento, Vida Terrestre, Parcerias e Meios de Implementação.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelece um marco regulatório para a gestão dos Resíduos Sólidos. A lei estabelece as bases de uma prática que promete marcar a ação das empresas e a gestão do lixo no Brasil: a logística reversa (CEMPRE, 2012).

O objetivo geral do projeto “Um computador nota 10” foi desenvolver metodologia de metarreciclagem de computadores e equipamentos eletroeletrônicos, para a construção de kits educacionais e sua destinação aos alunos e professores de escolas públicas do município visando melhorias educacionais no período de isolamento social, pandemia COVID-19.

2. Metodologia

A Política Nacional de Resíduos Sólidos –Lei 12.305/2010 estabeleceu um marco regulatório para a gestão de Resíduos Sólidos, enquadrando os resíduos eletroeletrônicos na categoria da obrigatoriedade da Logística reversa, porém, ainda não existem instruções claras para a adoção de procedimentos para a logística reversa de resíduos eletroeletrônicos - REE em instituições públicas federais ou privadas.

Desta forma, utilizou-se metodologia de investigação dos instrumentos legais e jurídicos a fim de proceder no “Projeto Um computador nota 10”, com a mesma metodologia de trabalho proposto pelo projeto de extensão Recuperação física dos resíduos eletroeletrônicos e inclusão digital de comunidades do entorno, iniciado em março de 2012.

Ao que antecedeu as ações propostas no projeto, foram definidas as responsabilidades das instituições envolvidas, conforme listados abaixo:

- Universidade Federal de Campina Grande:
 - Laboratório de Tecnologias Agroambientais/LTA e Tecnologia de Resíduos/LTR:
 - Disponibilizar a infraestrutura física e logística de recepção de eletroeletrônicos e doação dos kits de equipamentos;
 - Disponibilizar a caixa de ferramentas, equipamentos de limpeza, multímetros, chaves teste e outros materiais;
 - Capacitação técnica de professores e alunos envolvidos para execução das atividades do projeto;
 - Disponibilizar metodologias de metarreciclagem, termos de cessão de uso dos equipamentos e manual de cuidados e montagem de equipamentos eletroeletrônicos;
 - Virtus/CEEI:
 - Desenvolver sistema de acompanhamento e criação do site, para divulgação das ações e estabelecer vínculo entre doadores e beneficiados;
- Prefeitura Municipal de Campina Grande:
 - Secretaria de Educação e Cultura-SEDUC/PMCG:
 - Permitir o uso da imagem associada ao projeto;



- Disponibilizar o banco de dados dos alunos das escolas municipais;
- Responsabilizar-se pelo tombamento dos equipamentos doados incorporando-os ao patrimônio da prefeitura/ PMCG;
- Responsabilizar-se pela destinação final dos equipamentos ao término de sua vida útil;
- Fornecer transporte para coleta de equipamentos em empresas;
- Núcleo de Tecnologia do Município:
 - Fornecer pessoal para a execução de atividades;
 - Promover a assistência técnica no período de uso do equipamento;
- Empresa HP. INC:
 - Disponibilizar gratuitamente o software HP.REFRESH para uso indistinto nos equipamentos eletroeletrônicos e kits educacionais;
- Instituto Alpargatas:
 - Disponibilizar 277 kits de equipamentos formados por: CPU, monitores, cabos, mouse e teclados;
 - Providenciar transporte para o deslocamento dos equipamentos das fábricas de Montes Claros-MG e de Campina Grande-PB até o campus sede da UFCG;

As ações propostas foram iniciadas no ano de 2020, período que foi instituída a emergência sanitária no Brasil. Desta feita foram necessárias implantações de procedimentos de segurança a fim de garantir a salubridade da equipe de execução e demais usuários dos equipamentos. A metodologia utilizada seguiu elementos do Guia de Boas práticas para uma TIC mais sustentável/Porto Digital, da Estação de Metarreciclagem de Samambaia e a metodologia proposta pelo IPT/CEMPRE (2000) com adaptações.

Seguiu-se os procedimentos metodológicos com adaptações respeitando as realidades de atuação de cada membro da equipe executora. A UFCG encerrou o período com aulas presenciais e os alunos retornaram para os seus Estados de origem, ficando restrito o número de alunos na modalidade presencial e alunos na modalidade remota. As etapas realizadas foram conforme descritas a seguir:

1. Levantamento da base legal existente para aquisição e descarte de materiais em instituições públicas federais, estaduais e municipais (REMOTA);
2. Inventário dos resíduos eletroeletrônicos entregues por pessoas físicas no Ponto de Entrega Voluntária do Programa de Extensão da UFCG (PRESENCIAL);
3. Diagnóstico dos resíduos eletroeletrônicos e verificação de formas de reutilização, metarreciclagem e pós consumo, observando-se os trâmites legais de desfazimento desses resíduos (PRESENCIAL);
4. Logística de recebimento das máquinas, contatos remotos com pessoas jurídicas, setores administrativos e jurídicos de instituições doadoras (REMOTA);



5. Caracterização e triagem dos equipamentos servíveis, com posterior período de quarentena para eliminação de riscos de contaminação pelo Sars-Cov-2 (PRESENCIAL);
6. Limpeza interna da máquina, desmonte e a catalogação das peças com potencial de recuperação e reaproveitamento, com o respectivo inventário (placa-mãe, disco rígido, CD, pilha, memória, fonte, cooler, processador e cabos) (PRESENCIAL);
7. Os monitores foram conectados à energia elétrica e, após a sinalização foram interligados ao computador teste para observar o desempenho do equipamento. Ocorrendo à separação dos equipamentos aptos e inaptos à metarreciclagem (PRESENCIAL);
8. A deleção completa dos dados do disco rígido foram realizadas seguindo padrões internacionais utilizando um software disponibilizado pela HP (HP Refresh) (PRESENCIAL);
9. Em seguida foi realizada a instalação do sistema operacional leve e simples baseado em software livre (ou seja, sem custos de licença) e personalização da máquina, habilitando crianças ao estudo online sem necessidade de nenhuma configuração adicional (PRESENCIAL);
10. No momento da entrega das máquinas os professores e/ou as famílias contempladas juntamente com a escola assinaram um documento denominado Termo de Compromisso e Cessão de Uso, com informes sobre cuidados e responsabilidade do descarte final dos equipamentos (PRESENCIAL);
11. Contato com as famílias selecionadas para agendamento da entrega do kit educacional (monitor, CPU, mouse, teclado) (REMOTA).

A HP lançou o projeto HP Refresh que além de ajudar no passo-a-passo dos bastidores do projeto, também desenvolveu e disponibilizou publicamente o Sistema Operacional - HP Refresh totalmente de graça.

O Sistema foi criado para limpar completamente o HD antes de instalar, seguindo normas internacionais de segurança sem qualquer permanência dos seus dados no equipamento. Depois de instalado o sistema completo ocupou menos de 2 GB de HD e funcionou muito bem com 2 GB de Memória RAM. Perfeito para computadores com menor poder de processamento.

3. Resultados

A equipe executora definiu as funções e a sequência metodológica utilizando-se de espaços físicos pré-definidos no laboratório de tecnologia de resíduos a fim de melhor eficiência logística. A figura 1 (A, B, C e D), representam as fases da metodologia com o recebimento do material, a manutenção, testes e entregas dos computadores.



Figura 1 – (A) Recebimento dos resíduos REE, (B) Metarreciclagem dos REE, (C) Fase de teste e (D) Entrega dos computadores.

Fonte: AUTOR, 2020

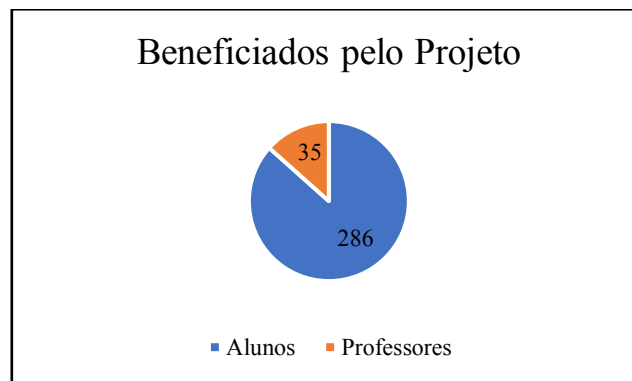


Figura 2 - Alunos e Professores beneficiados pelo Projeto 2020/2021

Fonte: AUTOR, 2021.

A partir de critérios de vulnerabilidade social e exclusão digital pré-estabelecidos, alunos e professores foram selecionados remotamente como os possíveis beneficiários de kits de computadores. As escolas contempladas abrangeram todos os núcleos educacionais do município (Figura 2), sendo 07 núcleos na zona urbana e 03 núcleos na zona rural, totalizando, 108 escolas beneficiadas pelo projeto, 22,22 % da zona rural e 77,78 % da zona urbana do município de Campina Grande -PB/ Brasil.

4. Considerações Finais



A metodologia da metareciclagem possibilitou a entrega de 321 kits educacionais formados por (CPU, monitor, mouse, teclado e cabos) a alunos e professores de escolas municipais, se mostrando eficiente na recuperação física e tecnológica dos equipamentos eletroeletrônicos.

A taxa de reaproveitamento dos computadores doados ao projeto foi de 56,67% de um total de 567 equipamentos doados ao projeto.

A atuação voluntária dos professores, técnicos e alunos foi imprescindível para obtenção de êxito em todas as etapas do projeto.

Agradecimentos

- A PROPEX/UFCG pela concessão de bolsas de extensão para os alunos;
- A HP.INC pela disponibilização gratuita dos instrumentos tecnológicos;
- A empresa Alpargatas e ao Instituto Alpargatas pela doação dos equipamentos eletroeletrônicos;
- A PMCG/SEDUC pela parceria;
- A toda a equipe executora, que mesmo correndo os riscos advindos da pandemia SARS COV 2, não evitaram esforços para realizar as ações do projeto.

Referências

BALDÉ, C.P., FORTI V., GRAY, V., KUEHR, R., STEGMANN, P.: The Global E-waste Monitor – 2017, United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna.

CEMPRE. **Política Nacional de Resíduos Sólidos – Agora é lei.** Novos desafios para poder público, empresas, catadores e população. Disponível em: <<https://cempre.org.br/wp-content/uploads/2020/11/6-Politica-Nacional-de-Residuos-S%C3%B3lidos-3.pdf>>. Acesso em: 15/07/2023.

IPT/CEMPRE. **Cadernos Temáticos para coleta seletiva.** São Paulo, 2000.

PORTO DIGITAL. **Guia de boas práticas para uma TIC mais sustentável.** Recife. Versão 1. 2013.

PROGRAMANDO O FUTURO. **Estação de metarreciclagem de Samambaia-DF.** Disponível em: <<https://www.programandoofuturo.org.br/metarreciclagem/>>. Acesso em: 15/07/2023.



NANOMATERIAIS EM RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS: IMPACTOS À SAÚDE E AO AMBIENTE

SISINNO, C.L.S.^{1*}; RIZZO, A.C.L.²; CUNHA, C.D.³

¹; ²; ³ Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) – Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

*e-mail do autor correspondente: csisinno@cetem.gov.br

Resumo

A Nanotecnologia permitiu a inserção no mercado consumidor de produtos com a presença de nanomateriais (NMs) engenheirados. Entretanto, ainda existem lacunas de conhecimento sobre os impactos negativos para a saúde e para o ambiente, principalmente em longo prazo, causados pela produção, utilização e eliminação dos NMs. Além dos compostos orgânicos e inorgânicos perigosos que podem ser encontrados nos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), alguns NMs engenheirados também podem estar na composição de diversos eletroeletrônicos, produzidos continuamente em um mundo cada vez mais tecnológico e com grandes pressões para uma transição energética mais sustentável. No Brasil não existe qualquer fonte de informação que indique a presença de NMs na composição de produtos de consumo, incluindo os equipamentos eletroeletrônicos, que no final de suas vidas úteis se tornarão REEE, sendo a reciclagem (ainda em baixo percentual e por vezes realizada informalmente) ou a disposição no solo, em muitos casos em locais inadequados, suas principais formas de destinação. Deste modo foi realizado um levantamento bibliográfico na literatura científica e a consulta em bancos de dados internacionais sobre produtos eletroeletrônicos que contêm NMs na busca de informações disponíveis que possam auxiliar na elaboração de um inventário preliminar sobre NMs em REEE. Os resultados mostraram lacunas de dados, escassez de estudos e de divulgação de informações sobre a presença de NMs nos REEE, indicando a necessidade da inserção desta questão no gerenciamento adequado dos REEE, a fim de prevenir os possíveis impactos destes novos materiais na saúde e no ambiente.

Palavras-chave: Nanomateriais Engenheirados; Resíduos Eletroeletrônicos; Impactos na Saúde e no Ambiente; Gerenciamento de Resíduos.

1. Introdução

A sociedade atual, impulsionada pelo consumismo, cada vez mais tecnológica e movida por novidade, rapidez e eficiência, em pouco tempo transforma os equipamentos elétricos e eletrônicos usados no dia a dia – em muitos casos em perfeito estado de uso –, em aparelhos obsoletos. Novas tecnologias parecem se tornar cada vez mais imprescindíveis em atividades do cotidiano e nas demandas profissionais, fazendo



com que a vida útil dos equipamentos seja reduzida, causando assim, uma crescente geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

Os equipamentos eletroeletrônicos são equipamentos, partes e peças cujo funcionamento adequado depende de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos, bem como os equipamentos para geração, transmissão, transformação e medição dessas correntes e campos, podendo ser de uso doméstico, industrial, comercial e de serviços e os REEE, por sua vez, são os equipamentos eletroeletrônicos, partes e peças que chegaram ao final da sua vida útil ou seu uso foi descontinuado (ABNT, 2013).

O Anexo III da Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu relativa aos REEE descreve atualmente, de uma forma geral, seis categorias: 1 – Equipamentos de regulação da temperatura; 2 – Telas, monitores e equipamentos com telas de superfície superior a 100 cm²; 3 – Lâmpadas; 4 – Equipamentos de grandes dimensões (com qualquer dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3); 5 – Equipamentos de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm, sendo que não se incluem nesta categoria os equipamentos abrangidos pelas categorias 1 a 3 e 6); 6 – Equipamentos de informática e de telecomunicações de pequenas dimensões (com nenhuma dimensão externa superior a 50 cm) (UE, 2012).

Nos países em desenvolvimento e em transição, a quantidade de REEE equivale, em média, de 1 % a 2 % de todos os resíduos sólidos; o que deve aumentar ainda mais em um futuro próximo (FADAEI, 2022). Em 2019 a geração de REEE no Brasil foi de 2,1 Mt, cerca de 4 % de um total global de 53,6 Mt (FORTI *et al.*, 2020). Deve-se destacar que em vários países em desenvolvimento – especialmente aqueles com baixa ou média renda –, uma quantidade considerável de REEE é descartada em locais de disposição inadequados e a reciclagem informal é amplamente realizada (FADAEI, 2022).

Os REEE podem conter compostos orgânicos e inorgânicos perigosos em sua composição e, além destas substâncias, nanomateriais (NMs) engenheirados também estão sendo utilizados cada vez mais em muitos produtos eletroeletrônicos (computadores, telefones celulares, eletrodomésticos, etc.) e em equipamentos usados de forma crescente na transição energética para fontes mais limpas, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos.

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) os NMs possuem qualquer dimensão externa na nanoescala (01 nm a 100 nm) ou tem estrutura interna ou estrutura de superfície na nanoescala e os NMs engenheirados são projetados para atenderem a um propósito ou função específica (ABNT, 2022). Uma definição atual da União Europeia descreve que um NM é um material natural, incidental ou fabricado, constituído por partículas sólidas, presentes isoladamente ou como partículas constituintes identificáveis de agregados ou aglomerados, e em que, na distribuição numérica da dimensão, 50 % ou mais destas partículas satisfazem, pelo menos, uma das seguintes condições: a) uma ou várias dimensões externas da partícula situam-se na gama de tamanhos entre 01 nm e 100 nm; b) a partícula tem uma forma alongada, como uma haste, uma fibra ou um tubo, em que duas dimensões externas são inferiores a 01 nm e a outra dimensão é superior a 100 nm; c) a partícula tem uma forma laminar, em que uma dimensão externa é inferior a 01 nm e as outras dimensões são superiores a



100 nm (UE, 2022). Os NMs exibem propriedades únicas, em comparação com suas dimensões maiores porque possuem uma área superficial relativamente maior quando comparados com a mesma massa de material produzido na escala macro, aumentando sua reatividade ou estabilidade em um processo químico. Além do tamanho, outras características também poderão influenciar nas suas propriedades magnéticas, eletrônicas, óticas, mecânicas e térmicas especiais (SHALEEN *et al.*, 2023).

Atualmente diversos setores econômicos utilizam produtos e processos com base nanotecnológica e em diferentes aplicações, entretanto, apesar de muitos produtos de consumo já possuírem em sua composição NMs engenheirados, esta informação não é obrigatória em muitos países, incluindo o Brasil. A falta de informação afeta todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos contendo NMs, ou seja, trabalhadores da produção, consumidores durante sua utilização, e trabalhadores na etapa final de sua vida útil. A informação sobre a presença de NMs em produtos é importante para a adoção de instrumentos de gestão (inclusive dos resíduos contendo NMs, como alguns REEE) e controle; para a tomada de decisões regulatórias e para a pesquisa científica.

Neste contexto este trabalho tem o objetivo de destacar a importância do conhecimento sobre a presença destes materiais, indicar lacunas de informações/conhecimento e reforçar o alerta sobre a necessidade de ações de segurança durante todas as fases do gerenciamento dos REEE, uma vez que ainda existem dúvidas sobre os riscos potenciais dos NMs para a saúde e para o ambiente – principalmente em longo prazo –, que podem ser potencializados pelas práticas inadequadas de destinação e reciclagem dos REEE – e dos RSU –, ainda frequentemente observadas no Brasil.

2. Metodologia

Este artigo foi elaborado com base no levantamento de dados disponíveis em publicações científicas não indexadas e indexadas (Periódicos CAPES e *Google Scholar*, 2013-2023), informações técnicas encontradas na *internet* e em três bancos de dados internacionais *on line* de produtos de consumo que contêm NMs, com enfoque nos eletroeletrônicos, que são uma das principais fontes de NMs nos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no final de seu ciclo de vida. Uma vez que são vários os tipos de REEE, foram escolhidas neste trabalho para a pesquisa dos NMs em sua composição as categorias de alto valor agregado e maior disponibilidade no mercado segundo Xavier *et al.* (2018) – monitores (CRT e LCD); informática e telecomunicações –, além dos NMs encontrados em equipamentos largamente utilizados nos dias atuais para uma transição energética mais sustentável, como baterias de veículos elétricos e painéis solares fotovoltaicos, que estão na categoria de equipamentos de grande porte, cuja quantidade global em 2019 alcançou o segundo lugar em produção segundo Forti *et al.* (2019). As informações sobre NMs presentes em produtos de consumo foram coletadas em agosto/2023 em três bancos de dados internacionais *on line*: *Nanodatabase* (NDB) – Dinamarca (<https://nanodb.dk/en/>), *Consumer Products Inventory* (CPI) – USA (<https://www.nanotechproject.tech/cpi/>) e *Nanotechnology Products Database* (NPD) (<https://product.statnano.com/>).

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado e será complementado com outros tipos de produtos de consumo encontrados nos RSU que também são fontes de NMs.



3. REEE e a presença de elementos potencialmente tóxicos

Muitas pesquisas mostram a importância do gerenciamento adequado dos resíduos devido à presença de EPT (Elementos Potencialmente Tóxicos, do inglês PTE – *Potentially Toxic Elements*) nos fluxos de RSU, onde vários REEE são descartados. O termo EPT é usado coletivamente para representar elementos como metais e não metais – como níquel, cádmio, chumbo, mercúrio e arsênio –, conhecidos por acumular, persistir e contaminar o ambiente e impactar negativamente a saúde humana e os organismos (SAINI *et al.*, 2017).

Os REEE constituem-se em uma mistura complexa de substâncias inorgânicas, como metais e metalóides, Elementos Terras Raras e compostos químicos orgânicos, incluindo plásticos e revestimentos de fios contendo várias substâncias. Estas substâncias podem ser classificadas como contaminantes primários, constituintes importantes que estão inicialmente presentes na fabricação dos equipamentos eletroeletrônicos; e contaminantes secundários, como Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), dioxinas e furanos, que são subprodutos gerados após a reciclagem inadequada ou durante a recuperação de materiais valiosos (PURCHASE *et al.*, 2020).

Nos dias atuais, 70 % dos produtos químicos tóxicos e perigosos encontrados no ambiente são originados de REEE, incluindo vários EPT, como chumbo, mercúrio e cádmio, bem como PVC (Cloro de Polivinila, do inglês *Polyvinyl Chloride*), POPs (Poluentes Orgânicos Persistentes) e BFR (retardadores de chama à base de bromo, do inglês *Brominated Flame Retardants*) (ABALANSA *et al.*, 2021). Os BFR podem ser encontrados em muitos componentes dos REEE e são utilizados para reduzir a inflamabilidade do produto, aparecendo, por exemplo, em gabinetes de computadores, conectores, fios e cabos (FORTI *et al.*, 2020). Os PBDE (Éteres Difenílicos Polibromados, do inglês *Polybrominated Diphenyl Ethers*) e as PBB (Bifenilas Polibromadas, do inglês *Polybrominated Biphenyls*) são exemplos de BFR (PURCHASE *et al.*, 2020).

Como elementos básicos na maioria dos REEE, as PCI (Placas de Circuito Impresso, do inglês PCB – *Printed Circuit Boards*) são amplamente utilizadas e seus resíduos contêm muitas substâncias perigosas, tais como compostos halogenados componentes de BFR, além de chumbo, mercúrio e cádmio (DUAN *et al.*, 2011). Substâncias como metais pesados, óxidos metálicos e sais de fósforo estão contidos na parte metálica e inorgânica dos tubos de raios catódicos (do inglês CRT – *Cathode Ray Tube*, de computadores e televisores) e de PCI. Chumbo – um elemento estrutural do vidro –, e bário – usado no vidro frontal/painel –, são substâncias tóxicas encontradas nos CRT. Outro perigo à saúde pode advir do revestimento de fósforo do vidro do painel. O termo fósforo é impróprio, pois este revestimento contém sais mistos de zinco, cádmio, vanádio, selênio, európio, magnésio, ítrio e outros materiais (LASITHIOTAKIS *et al.*, 2018). Os painéis de LCD (*Liquid Cristal Display*) são classificados como produtos de alto risco, pois contêm substâncias perigosas como PBDE e PBB, arsênio, chumbo, cádmio, cromo, mercúrio, antimônio, bário, berílio, cobre, níquel, selênio, prata, vanádio, zinco e índio (SAVVILOTIDOU *et al.*, 2014).

Giese *et al.* (2021) destacam que equipamentos que possam oferecer vazamento de mercúrio devem receber cuidado especial para evitar quebras e descrevem que REEE como PCI, discos rígidos, baterias, capacitores, tubos de raios catódicos (TV/monitor),



lâmpadas fluorescentes e cartuchos de impressoras devem ser encaminhados para empresas especializadas para tratamento por possuírem substâncias tóxicas em sua composição. Por meio da análise da composição dos REEE outros estudos também encontraram substâncias como PCBs (Bifenilas Policloradas) arsênio, cádmio, cromo hexavalente, zinco e selênio (FADAEI, 2022). Forti *et al.* (2020) citam que os REEE podem conter substâncias perigosas como Hidroclorofluorcarbonos e Clorofluorcarbonos e Fadaei (2022) também descreve como componentes perigosos presentes nos REEE os compostos radioativos e as micro e nanopartículas.

Deve-se destacar que apesar da existência de alguns instrumentos legais (como as Diretivas Europeias 2015/863/UE – que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE – RoHS: *Restrictions of the Use of Certain Hazardous Substances*) relativos à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos elétricos e eletrônicos (como cádmio, mercúrio, cromo hexavalente, PBB, PBDE, chumbo; e alguns ftalatos em dispositivos médicos e instrumentos de monitorização e controle) (UE, 2011; 2015), o controle destas substâncias ainda é muito complexo, por causa da grande mistura com REEE produzidos no passado (FORTI *et al.*, 2020). A Diretiva 2011/65/UE descreve, inclusive, que na revisão da restrição de outras substâncias perigosas sejam incluídas substâncias de tamanho muito reduzido ou de estrutura interna ou de superfície muito reduzidas que possam gerar impactos negativos para o ambiente ou trabalhadores que manipulem REEE (UE, 2011).

Também é importante lembrar que o hábito de guardar eletroeletrônicos antigos, principalmente os de pequeno porte e de informática, mesmo sem utilidade (GREEN, 2021), faz com que substâncias perigosas que atualmente não são mais utilizadas ainda possam estar em circulação e sejam liberadas no momento de seu descarte, sendo os trabalhadores os mais expostos. Na Tabela 1 são descritos alguns exemplos de REEE e substâncias tóxicas que podem estar em sua composição, segundo Giese *et al.* (2021).

REEE	Substância tóxica
Especialmente em fontes, cabos e placas	Alumínio
Capacitores de micro-ondas	Berílio
Baterias de chumbo ácido (<i>notebooks</i>)	Chumbo
Baterias de lítio de celulares	Cobalto
Especialmente em cabos e fios	Cobre
Termostatos bimetálicos em máquinas de café	Mercúrio
Baterias recarregáveis de <i>notebooks</i>	Níquel

Tabela 1 – Exemplos de REEE e algumas substâncias tóxicas presentes

Fonte: Adaptado de Giese *et al.* (2021)

4. REEE e a presença de potenciais nanomateriais engenheirados

Os RSU e os produtos no final de vida (EoL – *End of Life*) são consideradas duas das principais fontes potenciais de resíduos contendo NMs (ECHA, 2021; OECD, 2016). Com a crescente aplicação de NMs em produtos de consumo, a presença de NMs em fluxos de resíduos também cresce e entre os NMs mais utilizados estão a prata, o titânio, o zinco e os NMs à base de carbono (PART *et al.*, 2018).

Segundo Andersen *et al.* (2014) os principais NMs encontrados nos REEE são: nanotubos de carbono (CNT, do inglês *Carbon Nanotubes*), prata, dióxido de silício,



dióxido de titânio e óxido de zinco. Caballero-Guzman *et al.* (2015) descrevem dióxido de titânio em teclados e *mouse*; prata em telefones celulares e nanotubos de carbono em baterias de íon-Lítio, memória RAM e *chips* de computadores. Part *et al.* (2018) citam os seguintes NMs encontrados em aplicações na indústria eletrônica: dióxido de titânio, óxido de zinco, óxido de alumínio, óxido de ferro (II e III), dióxido de zircônio, ouro, prata, nanocristais núcleo-casca (*core-shell*), pontos quânticos (*quantum dots*), fulerenos, CNT, negro de fumo (*carbon black*), flocos de grafeno e outros metais e ligas (lítio, ferro, cobre, ródio, platina, lantânio, neodímio, etc.). A prata é encontrada em células fotovoltaicas e *displays*; negro de fumo em tintas e *toners* de impressão; flocos de grafeno em células solares; fulerenos e CNT em baterias e células solares (PART *et al.*, 2018).

5. Resultados e Discussão

Nos dados do NDB (5.367 produtos) e do CPI (1.833 produtos) de agosto/2023 foram analisadas as informações da categoria eletrônicos e computadores (subcategorias *hardware*, *display-TV* e dispositivos móveis). Células e painéis fotovoltaicos não foram encontrados e as baterias estão na categoria de eletrodomésticos. O NPD inclui 10.913 produtos de 68 países (agosto/2023) e foram analisadas as categorias: eletrônicos (subcategorias: máquinas de processamento de dados – *notebook*; acessórios elétricos – *mouse*, transistor, supercapacitor, carregador portátil, capa de celular, teclado, carregador de celular, *power line*, roteador; sensores; memórias; outros eletrônicos – celular); eletrodomésticos (subcategoria *display*); energias renováveis (subcategorias: baterias e células solares); impressão (tintas e impressoras); e outras categorias (fone de ouvido). Na Tabela 2 estão descritos alguns produtos de consumo (que englobam os setores de informática e energia sustentável) e respectivos NMs encontrados na sua composição, não sendo considerados os dados quantitativos. Observa-se a predominância de nano-prata, que é um NM amplamente utilizado em muitos bens de consumo e diversos segmentos, e de outros NMs como nanotubos de carbono, grafeno, dióxido de titânio e silício, igualmente utilizados em muitas aplicações. Deve-se destacar que muitos NMs não estão reportados nos produtos, pois estes bancos de dados não são compulsórios. Pavlicek *et al.* (2021) questionam o fato de que mesmo em bancos de dados compulsórios – como o da França –, muitas informações são incompletas e persistem por toda a cadeia de suprimentos.

Estes dados fazem parte de um inventário preliminar que está sendo organizado com produtos de consumo encontrados nos RSU que contêm NMs, e embasará a escolha e análise dos principais NMs que podem estar presentes em compostos orgânicos de RSU passíveis de serem utilizados na agricultura, em uma etapa posterior deste trabalho. Esta preocupação se baseia no fato de que o composto orgânico contendo NMs poderá ser fonte secundária de contaminação, caso seja depositado no solo ou usado na agricultura (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018), podendo afetar a biota do solo, bioacumular e ser transferido pela cadeia trófica. Deve-se destacar também que alguns resíduos de alimentos podem conter NMs (por exemplo, óxido de zinco, carbonato de cálcio, dióxido de titânio, CNT, nanoargila, prata, dióxido de silício), usados como aditivos e em embalagens de alimentos (BOLDRIN *et al.*, 2014; PART *et al.*, 2018).



Produto de consumo	Nanomaterial (NDB)	Nanomaterial (CPI)	Nanomaterial (NPD)
<i>Mouse</i>	Prata, Dióxido de Titânio	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
Protetor de teclado	Prata	nd	nd
Processador	Silício	Silício, Cobre	nd
Suporte de celular	Alumínio	nd	nd
Fone de ouvido	Nanotubos de Carbono	nd	Grafeno
Teclado de computador	Prata	Prata, Dióxido de Titânio	Prata
<i>Notebook</i>	nd	Prata	Dióxido de Silício
Telefone celular	nd	Prata	Grafeno
Memória	nd	Silício, Dióxido de Silício, Cobalto, Nanotubos de Carbono	Nanotubos de Carbono
Sensores (bateria)	nd	nd	Grafeno
Transistor	nd	nd	Nanotubos de Carbono
Supercapacitor	nd	nd	Grafeno, Nanotubos de Carbono
Carregador portátil	nd	nd	Grafeno
Capa de celular	nd	nd	Cobre
Carregador de celular, <i>Power line</i> , roteador	nd	nd	Prata
<i>Display</i>	nd	Nanotubos de Carbono, Silício	Prata, Nanocristais, Cristais líquidos
Baterias íon-Lítio	Fosfato	nd	Silício, Grafite, Grafeno
Bateria	nd	Titanato, Cerâmica	Grafeno, Nanodiamante
Células solares	nd	nd	Grafeno, Dióxido de Silício, Dióxido de Titânio, Telureto de Cádmio, Arseneto de Gálio
Tinta (PCI, <i>display</i>)	nd	nd	Prata
Tinta (outras aplicações eletrônicas)	nd	Prata	Nanotubos de Carbono, Grafeno, Cobre, Níquel
Impressora	nd	nd	Prata
Impressora 3D	nd	nd	Nitreto de Boro, Grafeno, Nanoargila

Tabela 2 – Produtos de consumo eletroeletrônicos (informática e energia sustentável) e nanomateriais
Fonte: Adaptado de NDB, CPI e NPD (agosto/2023). **nd** = não descrito

5.1 Impactos no ambiente e na saúde da exposição aos NMs engenheirados e a importância da informação, conscientização/educação para prevenção

Tanto as substâncias tóxicas como os NMs engenheirados presentes nos REEE podem atingir o homem e o ambiente por diversas vias de exposição. Normalmente, os NMs entram no organismo por inalação, ingestão ou via dérmica (ECHA, 2021).

A exposição ocupacional aos NMs pode acontecer principalmente por meio do contato com líquidos contendo NMs (via dérmica) e transportados pelo ar (via inalatória). A exposição dos trabalhadores aos NMs pode ocorrer durante vários processos mecânicos, físicos e químicos, sendo que as atividades manuais aumentam a probabilidade de exposição inalatória e dérmica. Vários estudos mostraram que a trituração dos REEE foi identificada como um dos *hotspots* de emissões de NMs entre



outras etapas da reciclagem (ECHA, 2021). A reciclagem informal irá expor tanto os trabalhadores (incluindo crianças e mulheres grávidas) como a população vizinha às áreas de trabalho (por meio da contaminação do ar, água e alimentos) (FORTI *et al.*, 2020). Os riscos relacionados à disposição inadequada podem causar emissões para o solo e a água, afetando a população e contaminando o ambiente (ECHA, 2021).

Os NMs tem a capacidade de entrar, se translocar e causar danos aos organismos vivos. Esta habilidade resulta primeiramente do seu pequeno tamanho, que permite sua penetração pelas barreiras fisiológicas e transporte pelos sistemas circulatório e linfático, alcançando os tecidos e órgãos do corpo, e potencialmente causar danos nos processos celulares, provocando doenças. Alguns NMs, dependendo de sua composição e tamanho, podem produzir danos irreversíveis às células por estresse oxidativo e/ou danos às organelas. Doenças no trato gastrointestinal, sistema respiratório, cardíaco, em órgãos-alvo (como fígado) e doenças neurodegenerativas e autoimunes são associadas à exposição aos NMs. Por exemplo, a prata, amplamente utilizada, é tóxica para humanos ou células animais na forma de nanopartículas (BUZEA *et al.*, 2007).

Com relação aos impactos no ambiente, vários fatores podem influenciar a toxicidade dos NMs, entretanto, já foram observados efeitos adversos como bioacumulação, redução no crescimento e na reprodução, redução da biomassa e alteração na atividade da comunidade microbiana, etc. (BOUR *et al.*, 2015). A fim de abordar a segurança e a sustentabilidade dos NMs, o conceito de *Safe by Design* tem sido usado para atendimento à Economia Circular e para identificar, estimar e eliminar/minimizar riscos e incertezas para os seres humanos e para o ambiente ao longo do ciclo de vida do produto e ao longo de toda a cadeia de valor (ECHA, 2021).

Um dos pontos fundamentais sobre o correto manejo dos REEE para evitar seus impactos negativos na saúde e no ambiente é a informação. Algumas considerações podem ser feitas em um estudo realizado sobre a percepção da população brasileira com relação aos REEE (lixo eletrônico, termo usado na pesquisa). Entre os participantes da pesquisa, 87 % já haviam ouvido falar em lixo eletrônico; 42 % relacionaram lixo eletrônico a aparelhos eletrônicos e eletrodomésticos quebrados e destes, 20 % ligaram o termo somente a esses aparelhos; 09 % mencionaram pilhas e baterias; 07 % citaram celular, computador, *notebooks*; e 06 % acreditam que são diversos tipos. Com relação à destinação, 50 % dos participantes descartam com alguma frequência os eletrônicos e pilhas usados junto com o lixo comum (lixo do banheiro/cozinha) e 71 % alegaram que não há muita informação na mídia sobre o lixo eletrônico e seu descarte correto (GREEN, 2021). Estes resultados mostram o grande desafio que é a questão do conhecimento sobre o impacto dos REEE pela percepção da população estudada, pois para aumentar o nível de conscientização, torna-se essencial mais informação.

No caso dos NMs encontrados nos REEE, uma vez que se apresentam possíveis riscos na produção, uso e destinação dos produtos contendo NMs torna-se necessário que seja fomentado e protegido o direito à informação (LEAL; HOHENDORFF, 2017). Estes possíveis riscos estão relacionados à segurança do trabalhador durante a fabricação de NMs ou produtos contendo NMs; à segurança do consumidor na utilização ou aplicação de bens de consumo contendo NMs; e nos impactos negativos ao ambiente durante a fabricação de produtos ou no final do seu ciclo de vida pela sua liberação em efluentes e resíduos (MARCHANT; SYLVESTER, 2006).



Entretanto, a informação deverá vir sempre acompanhada de educação/conscientização, pois é insuficiente descrever informações em manuais de segurança para trabalhadores; e em etiquetas, rótulos ou propaganda para consumidores, sem que sejam realizadas ações para que todos os envolvidos leiam, interpretem, conheçam e compreendam estas informações (ENGELMANN; CHERUTTI, 2013). Segundo a ECHA (2021) um grande desafio para a rotulagem de NMs em todos os produtos está relacionado às lacunas em métodos analíticos padronizados para detectar, identificar e quantificar NMs em matrizes complexas dos produtos.

As fontes de informação sobre os NMs nos produtos de consumo são importantes instrumentos para gestores, cientistas, organismos reguladores e consumidores. Apesar das deficiências na quantificação dos NMs, essas fontes podem fornecer indicações para determinar a composição dos resíduos (nanoresíduos ou resíduos contendo NMs) e serem utilizadas em Análise de Fluxo de Material (MFA, do inglês *Material Flow Analysis*) de NMs para avaliar seu destino no ambiente e para apoiar a tomada de decisões regulatórias na avaliação da segurança dos NMs (ECHA, 2021). No Brasil apenas a RDC Nº 751/2022 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) relativa aos dispositivos médicos, dispõe sobre seu controle, registro, rotulagem e enquadramento segundo o risco intrínseco que representam à saúde do usuário, paciente, operador ou terceiros envolvidos, classificando todos os que incorporam NMs ou consistem em NMs de acordo com o potencial de exposição interna (BRASIL, 2022).

6. Considerações finais

Vários produtos de consumo, incluindo equipamentos eletroeletrônicos há muitos anos já possuem em seus componentes diversos NMs engenheirados. O desenvolvimento de regulamentos e normas adequados para a gestão dos REEE é um esforço contínuo e a preocupação com a presença de NMs nesses resíduos também deve ser considerada durante todas as etapas do seu gerenciamento. O início da normalização com a elaboração das normas da ABNT da área de Nanotecnologia no Brasil é uma importante iniciativa para a discussão de várias questões nas diversas esferas que envolvem a produção, o uso e o descarte de produtos contendo NMs e a segurança de consumidores e trabalhadores. A ANVISA também mostra preocupação com a classificação de risco de dispositivos médicos que possuem NMs.

Entretanto, aliado a todos os problemas inerentes aos escassos dados formais sobre o gerenciamento dos REEE e sua baixa escala; exportação de produtos para países subdesenvolvidos; ações informais e inadequadas; produtos não projetados sob a perspectiva do *design* circular para facilitar sua desmontagem e reaproveitamento, etc. observa-se a pouca informação encontrada nas publicações científicas e técnicas sobre a presença de NMs nos REEE e as lacunas existentes nos bancos de dados internacionais, mostrando a necessidade de maior divulgação deste assunto para todos os envolvidos no ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos. Assim, apesar de todos os benefícios dos NMs incorporados aos produtos eletroeletrônicos, é necessário um esforço intensivo na divulgação e educação/conscientização sobre a importância do gerenciamento adequado dos REEE pela possível presença de NMs engenheirados, cujos efeitos adversos,



principalmente em longo prazo, ainda necessitam de estudos adicionais, para a prevenção de possíveis impactos na saúde e no ambiente.

Agradecimentos

Cristina Sisinno agradece ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo fomento da bolsa PCI-DA do MCTI no CETEM.

Referências

ABALANSA, S.; EL MAHRAD, B.; ICELY, J.; NEWTON, A. Electronic waste, an environmental problem exported to developing countries: the good, the bad and the ugly. *Sustainability*, v.13, 5302, 2021. DOI: 10.3390/su13095302.

ANDERSEN, L.; CHRISTENSEN, M.F.; NIELSEN, J.M. **Nanomaterials in waste – Issues and new knowledge**. Environmental Project No. 1608. Copenhagen: The Danish Environmental Protection Agency, 2014.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/TR 16197**. Nanotecnologias: compilação e descrição de métodos de triagem da toxicidade para nanomateriais manufaturados. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

BOLDRIN, A.; HANSEN, S.F.; BAUN, A.; HARTMANN, N.I.B.; ASTRUP, T.F. Environmental exposure assessment framework for nanoparticles in solid waste. *Journal of Nanoparticle Research*, v.16, 2394, p.1-19, 2014. DOI: 10.1007/s11051-014-2394-2.

BOUR, A.; MOUCHET, F.; SILVESTRE, J.; GAUTHIER, L.; PINELLI, E. Environmentally relevant approaches to assess nanoparticles ecotoxicity: A review. *Journal of Hazardous Materials*, v.283, p.764-777, 2015. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2014.10.021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução da Diretoria Colegiada – **RDC Nº 751** de 15/09/2022. Dispõe sobre a classificação de risco, os regimes de notificação e de registro, e os requisitos de rotulagem e instruções de uso de dispositivos médicos. D.O.U Nº 180 de 21/09/2022.

BUZEA, C.; BLANDINO, I.I.P.; ROBBIE, K. Nanomaterials and nanoparticles: sources and toxicity. *Biointerphases*, v.2, p.MR17-MR172, 2007.

CABALLERO-GUZMAN, A.; SUN, T.; NOWACK, B. Flows of engineered nanomaterials through the recycling process in Switzerland. *Waste Management*, v.36, p.33-43, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2014.11.006.

DUAN, H.; HOU, K.; LI, J.; ZHU, X. Examining the technology acceptance for dismantling of waste printed circuit boards in light of recycling and environmental



concerns. **Journal of Environmental Management**, v.92, p.392-399, 2011. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.10.057.

ENGELMANN, W.; CHERUTTI, G. Da Educação ao Direito à Informação: desafios e possibilidades para estes direitos fundamentais na era das nanotecnologias, p.245-264. In: **Sistemas Jurídicos Contemporâneos e Constitucionalização do Direito: releituras do Princípio da Dignidade Humana** (Wilson Engelmann; Taysa Schiocchet, coords.). Curitiba: Juruá, 290 p., 2013.

EUROPEAN CHEMICALS AGENCY. **Study on the Product Lifecycles, Waste Recycling and the Circular Economy for Nanomaterials**. Helsinki: ECHA, 2021. DOI: 10.2823/708711.

FADAEI, A. E-waste management status worldwide: major challenges and solutions. **Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences**, v.12, p.281-293, 2022.

FORTI, V.; BALDÉ C.P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn/Geneva/Rotterdam: UNU/UNITAR/ITU/ISWA, 120 p., 2020.

GIESE, E.C.; XAVIER, L.H.; OTONI, M.; ARAÚJO, R.A. **Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 60 p., 2021.

GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil – 2021**. 20 p., 2021. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf.

LASITHIOTAKIS, M.; PSANIS, C.; TRIANTAFYLLOU, E.; NIKOLAOU, P.; KOUVARAKIS, G.; MICHALOPOULOS, N.; SINIOROS, P.; BISKOS, G. Heavy metals inhalation exposure analysis from particulate matter emitted from dry and wet recycling processes of waste electrical and electronic equipment. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, v.38:e13265, p.1-13, 2019. DOI: 10.1002/ep.13265.

LEAL, D.W.S.; HOHENDORFF, R.V. A era das nanotecnologias no mercado consumidor: a inserção dos “nanoprodutos” ao cotidiano e o direito à informação. **Direito & Desenvolvimento**, v.9, p.286-302, 2018. DOI: 10.25246/direitoedesenvolvimento.v9i2.800.

MARCHANT, G.E.; SYLVESTER, D.J. Transnational models for regulation of nanotechnology. **Journal of Law, Medicine and Ethics**, v.34, p.714-725, 2006. DOI: 10.1111/j.1748-720X.2006.00091.x.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT. **Nanomaterials in Waste Streams – Current Knowledge on Risks and Impacts**. 98 p., 2016. DOI: 10.1787/9789264249752-en.

PART, F.; BERGE, N.; BARAN, P.; STRINGFELLOW, A.; SUN, W.; BARTELT-HUNT, S.; MITRANO, D.; LI, L.; HENNEBERT, P.; QUICKER, P.; BOLYARD, S.C.; HUBER-HUMER, M. A review of the fate of engineered nanomaterials in municipal solid waste streams. **Waste Management**, v.75, p.427-449, 2018. DOI: 10.1016/j.wasman.2018.02.012.



PAVLICEK, A.; PART, F.; ROSE, G.; PRAETORIUS, A.; MIERNICKI, M.; GAZSÓ, A.; HUBER-HUMER, M. A European nano-registry as a reliable database for quantitative risk assessment of nanomaterials? A comparison of national approaches. **NanoImpact**, v.21, 100276, 2021. DOI: 10.1016/j.impact.2020.100276.

PURCHASE, D.; ABBASI, G.; BISSCHOP, L.; CHATTERJEE, D.; EKBERG, C.; ERMOLIN, M.; FEDOTOV, P.; GARELICK, H.; ISIMEKHAI, K.; KANDILE, N.G.; LUNDSTRÖM, M.; MATHARU, A.; MILLER, B.W.; PINEDA, A.; POPOOLA, O.E.; RETEGAN, T.; RUEDEL, H.; SERPE, A.; SHEVA, Y.; SURATI, K.R., WALSH, F.; WILSON, B.P.; WONG, M.H. Global occurrence, chemical properties, and ecological impacts of e-wastes (IUPAC Technical Report). **Pure and Applied Chemistry**, v.92, p.1733-1767, 2020. DOI: 10.1515/pac-2019-0502.

SAINI, R.; KHANNA, R.; DUTTA, R.K.; CAYUMIL, R.; IKRAM-UL-HAQ, M.; AGARWALA, V.; ELLAMPARUTHY, G.; JAYASANKAR, K.; MUKHERJEE, P.S.; SAHAJWALLA, V. A novel approach for reducing toxic emissions during high temperature processing of electronic waste. **Waste Management**, v.64, p.182-189, 2017. DOI: 10.1016/j.wasman.2017.02.023.

SAVVILOTIDOU, V.; HAHLADAKIS, J.N.; GIDARAKOS, E. Determination of toxic metals in discarded Liquid Crystal Displays (LCDs). **Resources, Conservation and Recycling**, v.92, p.108-115, 2014. DOI: 10.1016/j.resconrec.2014.09.002.

SHAHEEN, I.; KHALIL, A.; SHAHEEN, R.; TAHIR, M.B. A review on nanomaterials: types, synthesis, characterization techniques, properties and applications. **Paradigm Academic Press Innovation in Science and Technology**, v.2, p.56-62, 2023. DOI: 10.56397/IST.2023.01.04.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 8 de junho de 2011 relativa à restrição do uso de determinadas substâncias perigosas em equipamentos eléctricos e electrónicos (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L0065, p.1-35.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos eléctricos e electrónicos (REEE) (reformulação). **Jornal Oficial da União Europeia**. L197, p.38-61.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva Delegada 2015/863/UE da Comissão de 31 de março de 2015 que altera o anexo II da Diretiva 2011/65/UE do Parlamento Europeu e do Conselho no que diz respeito à lista de substâncias sujeitas a restrição. **Jornal Oficial da União Europeia**. L137, p.10-12.

UNIÃO EUROPEIA. Recomendação da Comissão 2022/C 229/01 de 10 de junho de 2022 sobre a definição de nanomaterial. Atualização da Recomendação da Comissão de 18 de outubro de 2011 (2011/696/UE). **Jornal Oficial da União Europeia**. L275, p.38-40.

XAVIER, L.H.; OTTONI, M.S.O.; GOMES, C.F.; ARAUJO, R.A.; BICOV, N.; NOGUEIRA, M.; ESPINOSA, D.; TENÓRIO, J. **Guia de desmontagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 42 p., 2020.



OPÇÕES DE CIRCULARIDADE DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS AO FIM DA VIDA ÚTIL

Érika A. Tavares Marques^{1*}; Uedja Tatyane G. M. Lima²; Maria do Carmo Sobral³

¹ Pós-doc da UFPE, ² Doutoranda da UFPE, ³ Profa. Dra. da UFPE

*erikatmbio@gmail.com

Resumo

Os painéis solares, ao atingirem o fim de sua vida útil, podem representar uma fonte de resíduos perigosos se não forem adequadamente gerenciados. Apesar dos significativos benefícios em termos de escalabilidade provenientes da expansão da geração de energia solar, existe o risco de que esses painéis se transformem em resíduos prejudiciais ao meio ambiente. No Brasil, a capacidade instalada de energia fotovoltaica já atingiu cerca de 23,9 gigawatts (GW) e essa capacidade está prevista para aumentar ainda mais nos próximos anos. Nesse contexto, o objetivo desta pesquisa foi abordar, por meio de uma revisão da literatura, alternativas circulares para a destinação ambientalmente adequada dos resíduos provenientes de painéis fotovoltaicos. A análise revelou que, apesar das diversas opções circulares exploradas, como reparo, revenda e reutilização, o Brasil atualmente adota somente a alternativa de reciclagem ao final do ciclo de vida dos painéis. Isso abre espaço para futuras investigações visando aprimorar a gestão desses resíduos, a valorização de seus componentes, assim como a redução de sua disposição em aterros sanitários.

Palavras-chave: Placas fotovoltaicas; Gestão de resíduos; Impactos ambientais.

1. Introdução

A matriz elétrica brasileira é composta predominantemente de fontes renováveis, como hidroelétrica, eólica, solar e biomassa, e embora o predomínio da fonte hídrica seja consideravelmente relevante, sua participação na produção total vem diminuindo, assim, outras fontes renováveis vêm ganhando destaque, como a energia solar (EPE, 2019).

A energia solar fotovoltaica avança cada vez mais no Brasil. Segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2021), essa modalidade de energia elétrica cresceu, nos últimos 7 anos, em média 151% ao ano. Mesmo com toda essa expansão, ainda é um mercado que pode ser mais explorado, já que é relativamente novo no Brasil (ÓRIGO ENERGIA, 2020).

A energia solar vem batendo recordes de geração no Brasil em 2022. A fonte cresce ano a ano, apesar de ainda representar uma parcela minoritária da matriz do país. Fonte limpa e renovável, e portanto estratégica em processos de redução de emissão de gases que contribuem para a mudança climática, a geração de energia solar é relativamente recente no Brasil, e ganhou impulso a partir de meados da década de



2010. Ela é dividida em dois tipos: centralizada, ligada a grandes usinas, e distribuída, relacionada a pequenas unidades como casas com painéis fotovoltaicos no telhado (NEXO JORNAL LTDA, 2023).

A energia solar fotovoltaica acaba de atingir 23,9 gigawatts (GW) de capacidade instalada no País, ultrapassando a energia eólica, que registra 23,8 GW, informa a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2023). O grande impulso da fonte de energia gerada pelo sol vem sendo dado pela Geração Distribuída (GD), sistema de geração de energia elétrica instalado em telhados, empresas e terrenos, e que possui prazo para aproveitar benefícios carregados desde o início da implantação da fonte no Brasil, em 2012, como a não cobrança do serviço de transmissão pelas distribuidoras. “A tecnologia ajuda a diversificar a matriz elétrica do País, aumentar a segurança de suprimento, reduzir a pressão sobre os recursos hídricos e proteger a população contra mais aumentos na conta de luz”, afirma em nota Rodrigo Sauaia, presidente da Absolar.” (EXPERT XP, 2023).

A energia fotovoltaica é vista como uma promessa em termos de energias renováveis, pois, a sua geração depende apenas da incidência de raios solares e da placa fotovoltaica (GUIMARÃES et al., 2021). A energia solar decorre de uma fonte limpa e renovável, entretanto, os equipamentos utilizados na produção de energia elétrica através do sol para realizar a conversão podem causar danos ao meio ambiente e aos seres humanos, caso sejam descartados de forma inadequada, pois, possuem metais pesados em sua composição (STEINER, 2020).

Os painéis fotovoltaicos (PV) são fontes de energia sem custo de combustível, entretanto, com custo de produção relativamente ainda alto e são fabricados com materiais que são esgotáveis e ambientalmente inseguros. Alguns aspectos relativos à sustentabilidade devem ser considerados, como custo, disponibilidade de recursos e impacto ambiental (ANSELMO, 2019).

Estudos acerca da vida útil e obsolescência do sistema, preveem um grande número de painéis obsoletos na próxima década (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019; MAHMOUDI; HUDA; BEHNIA, 2019). Sendo assim, ainda que os painéis fotovoltaicos possuam uma média de 25 anos de vida útil (PADOAN; ALTIMARI; PAGNANELLI, 2019), há tempo hábil para propor alternativas, prever e gerenciar os impactos ambientais causados pelo fim de vida das células fotovoltaicas, componentes de complexa reciclagem e reuso. Ademais, graças ao avanço do setor no Brasil, encontra-se na gestão desse produto em fim de vida, um campo de pesquisa que ainda demanda desenvolvimento em âmbito nacional.

Enquanto aumentamos a geração de lixo, a gestão dos resíduos sólidos no país ainda permanece crítica, com um quadro de grande déficit. Extrair recursos naturais de um lugar e enterrá-los em outro pode parecer algo ineficiente do ponto de vista econômico; no entanto, é isto que o Brasil vem fazendo com a maior parte dos seus resíduos sólidos. O custo é alto, não apenas pelo desperdício de matéria-prima, mas pelos danos ambientais e à saúde pública (MOURA, SOUZA; SACCARO JÚNIOR, 2016).

Uma solução crucial para enfrentar esse desafio é a implementação de uma Economia Circular (EC) (CE, 2023). A integração entre a energia solar fotovoltaica e outras fontes de energia renovável na EC é importante para um crescimento rápido e



sustentável. Embora as definições de EC variem, a implementação e a recirculação de materiais atingindo a escala econômica, alavancando ações como reduzir, reutilizar, reparar, remanufaturar e reciclar (KIRCHHERR et al., 2017; VAN LOON et al., 2021).

O objetivo desse artigo é alertar para os impactos socioambientais da destinação incorreta dos painéis fotovoltaicos (PV) ao fim da vida útil e a proposição de opções de circularidade dos PVs buscando a minimização dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE).

Revisão de Literatura

A expansão do mercado fotovoltaico nos últimos 20 anos, tem com consequência o crescimento exponencial da geração de resíduos fotovoltaicos globais cumulativos. Um descarte adequado de painéis fotovoltaicos desativados é essencial para evitar riscos ambientais e para recuperar materiais de valor agregado (ANASANELLI et al., 2021). A quantidade de resíduos fotovoltaicos em todo planeta, pode atingir cerca de 1,7 a 8,0 milhões de toneladas em 2030 e 60 milhões de toneladas em 2050, assumindo uma vida útil de 30 anos dos painéis solares (MANNO et al., 2021).

O processo de fabricação de células solares envolve uma série de produtos químicos nocivos. Essas substâncias, semelhantes às usadas na indústria geral de semicondutores, incluem ácido sulfúrico, fluoreto de hidrogênio, ácido clorídrico, ácido nítrico, 1,1,1-tricloroetano e acetona. A quantidade e tipo de produtos químicos utilizados depende do tipo de célula e da tecnologia utilizada (PAIANO, 2015). Pode-se encontrar também alguma variabilidade no uso de produtos químicos para produzir o mesmo tipo de células solares fotovoltaicas por diferentes fabricantes de fotovoltaicos. Isso significa que cada fabricante tem sua própria receita para produzir um tipo de célula solar.

Muitos materiais perigosos, bem como gases explosivos e tóxicos, estão envolvidos nos processos de fabricação de células e módulos fotovoltaicos de filme fino. A maioria desses produtos químicos é altamente tóxica e prejudicial para os seres humanos e o meio ambiente (NKUISSI et al., 2019). De acordo com a literatura, resíduos de PVs, se não dispostos corretamente, podem causar os seguintes impactos negativos no ambiente e na saúde humana: (a) lixiviação de chumbo, (b) lixiviação de cádmio, (c) perda de recursos convencionais, principalmente vidro e alumínio, (d) perda de metais raros, principalmente prata, índio, gálio e germânio (BIO INTELIGENCE SERVICE, 2011).

Painéis fotovoltaicos em fim de vida (EoL), se não forem manuseados corretamente durante o descarte, podem representar uma ameaça à saúde humana e ao meio ambiente (KANG et al., 2012; DOMINGUEZ et al., 2017; DOMINGUEZ et al., 2019). Portanto, o descarte de painéis fotovoltaicos se tornará uma questão ambiental pertinente nas próximas décadas (CHOWDHURY et al., 2020).

A utilização de recursos valiosos e o potencial de geração de resíduos no ciclo ao fim da vida (EoL) das tecnologias fotovoltaicas impôs um planejamento adequado para uma infraestrutura de reciclagem fotovoltaica (XU et al., 2018). Para certificar a sustentabilidade do PV em grandes escalas de implantação, é crucial estabelecer tecnologias de reciclagem de baixo custo para a evolução da indústria de PV em



paralelo com a rápida comercialização dessas novas tecnologias (CHOWDHURY et al., 2020).

Como reflexo da expansão do uso da energia fotovoltaica, a recuperação dos painéis solares, não está acompanhando o crescimento exponencial de sua utilização. Uma alternativa viável para o enfrentamento desse desafio é a implementação de uma EC (CE, 2023). Nela, os processos podem ser reprojatados de modo a estender a vida útil dos materiais, reduzir os impactos ambientais e aumentar o retorno financeiro (BARROS et al., 2021).

Diversos estudos consideram a estrutura R como o "como fazer" e fator indissociável da EC (ZHU et al., 2010; REH, 2013, KIRCHHERR et al., 2017). Para refletir a ambição hierárquica nos níveis de estratégias circulares, a escada dos 10 R's é utilizada para aumentar a consciência de que a EC não está apenas relacionada à reciclagem de fluxos de resíduos e que as estratégias no topo da pirâmide têm maior preferência atreladas a menores impactos ambientais, o seguimento dessa hierarquia evita desperdício e cria valor potencial (CRAMER, 2017) (Figura 1).



Figura 1 – Níveis de circularidade: 10 R's.
Fonte: Adaptado de CRAMER (2017)

Seguindo a ordem de prioridade, deve ser adotado primeiramente a recusa de uso, seguida pela redução, que implica em diminuir a quantidade de material utilizada por unidade de produto. Em seguida, é importante repensar o produto em termos de sua circularidade. Além disso, devem ser consideradas opções como reutilização, reparo, reforma, remanufatura e reaproveitamento. Em última instância, a reciclagem de materiais e recursos é uma alternativa a ser explorada. No entanto, caso reste algum resíduo que não possa ser reciclado, a incineração com recuperação de energia pode ser considerada, embora essa prática não seja normalmente adotada dentro de uma economia circular (CRAMER, 2020).

Metodologia

A pesquisa foi realizada por meio de revisão narrativa da literatura, Prodanov e Freitas (2013) definem esta técnica como uma investigação de fontes teóricas atuais (artigos, livros e teses) sobre a temática que fundamenta o conteúdo trazendo os conceitos demandados na pesquisa. Para realizar essa revisão, foram utilizadas as seguintes bases de dados: *Science Direct*, Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de



Pessoal de Nível Superior (Capes) e a plataforma *Research Gate*. Foram selecionados para inclusão no estudo artigos publicados em periódicos, anais de congressos e relatórios técnicos, juntamente com outras fontes de referência relevantes. O período de busca abrangeu o intervalo de 2001 a 2023.

Resultados e Discussão

Em julho de 2012, a União Europeia revisou oficialmente a diretiva de REEE, adicionando componentes fotovoltaicos como dispositivos eletrônicos descartados, de modo que sejam incluídos nas seis categorias de REEE. Doravante, os elementos fotovoltaicos solares serão incluídos no sistema de gerenciamento de lixo eletrônico e devem ser coletados e reciclados (MC DONALD; PEARCE, 2010; BIO INTELLIGENCE, 2011).

O ciclo normalmente começa na mineração de materiais do solo e continua com o processamento e a purificação dos materiais até a fabricação dos compostos e produtos químicos utilizados no processamento e fabricação, transporte, instalação, uso, manutenção e eventual desativação e descarte e/ou reciclagem. Na medida em que os materiais são reutilizados ou reciclados no final de sua primeira vida em novos produtos, a estrutura é estendida de "berço a berço" (ANSELMO, 2019).

Segundo Jayawardena et al. (2019), as células fotovoltaicas que foram desenvolvidas até o presente, podem ser classificadas em 4 categorias principais chamadas gerações (Tabela 1).

Geração	Categorias
Primeira	Baseia-se em tecnologias de silício cristalino, monocristalino e policristalino, e em arsenieto de gálio (GaAs).
Segunda	Inclui células solares de filme fino de silício amorfo (a-Si) e silício microcristalino (μ c-Si), telureto de cádmio/sulfeto de cádmio (CdTe/CdS) e células solares de cobre, índio e gálio (CIGS).
Terceira	Envolve tecnologias baseadas em compostos mais recentes, incluindo filmes nanocristalinos, pontos quânticos ativos, tandem ou multicamadas empilhadas de materiais inorgânicos baseados em materiais III-V, como GaAs/GaInP, células solares orgânicas (polímeros), células solares sensibilizadas por corantes, etc.
Quarta	Também conhecido como "inorgânicos-em-orgânicos", combina o baixo custo/flexibilidade dos filmes finos de polímeros com a estabilidade de novas nanoestruturas inorgânicas, como nanopartículas metálicas e óxidos metálicos ou nanomateriais de base orgânica, como nanotubos de carbono, grafeno e seus derivados.

Tabela 1 – Evolução das gerações das células fotovoltaicas.

Fonte: JAYAWARDENA et al., (2019).

As primeiras quantidades mencionáveis de PV em fim de vida útil ocorrerão por volta de 2025/2030 (188 e 2,03 MW respectivamente), atingindo cerca de 68.000 MW



em 2050. O resultado futuro da pesquisa atual, desenvolvimento e testes de painéis fotovoltaicos e novas técnicas de reciclagem são difíceis de projetar. As tecnologias emergentes podem permitir um menor teor de substâncias perigosas e exigirão novos tipos de processos de reciclagem (BIO INTELLIGENCE SERVICE, 2011).

O crescente desperdício de painéis fotovoltaicos é um obstáculo ambiental a ser superado, mas também abre um leque de oportunidades para criar processos que possam transformar esse material descartado em uma solução econômica e ecológica. Para que isso aconteça, deve haver um fim de vida (EoL) adequado com tecnologias e políticas de gerenciamento para sistemas fotovoltaicos e, particularmente, módulos fotovoltaicos (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

De acordo com a análise de ciclo de vida realizada por Gertsakis e Lewis (2008), existem quatro diferentes abordagens de EoL para os módulos dos PV: reuso, reciclagem, incineração e aterro sanitário. Cada abordagem tem características particulares e pode oferecer uma melhoria diferente nos módulos fotovoltaicos em relação ao impacto ambiental geral. Apenas as abordagens de reuso e reciclagem podem ser consideradas como circulares.

O reuso ou reutilização também é uma escolha popular na hierarquia de gerenciamento de resíduos e, para módulos fotovoltaicos, isso envolve reparação (BARNES, 2017). A melhoria dos módulos solares é viável dependendo das condições dos materiais. Normalmente, os processos de reparo de módulos envolvem a aplicação de uma nova estrutura de alumínio ou substituição da caixa de junção. Também pode ser uma solução para substituir diodos, plugues, soquetes e muito mais (IRENA; IEA-PVPS, 2016).

Na reciclagem, diferentes processos estão sendo desenvolvidos para todas as tecnologias fotovoltaicas. Diversas técnicas podem ser usadas nesta fase (IRENA; IEA-PVPS, 2016), incluindo térmica (KOMOT, 2009; WANG et al., 2012) e química (orgânica e inorgânica) (DOI et al., 2001; KANG et al., 2012; PARK e PARK, 2014) e processos de reciclagem mecânica (LATUNUSSA et al., 2016).

A incineração de módulos solares, como lixo eletrônico, em geral, é prejudicial ao meio ambiente devido à liberação de metais pesados tóxicos, como o chumbo, na atmosfera. Outra abordagem linear que deve ser evitada é a disposição em aterro sanitário, a maioria dos casos, antes de ir para o aterro, o módulo fotovoltaico é separado do equilíbrio do sistema (BOS), que permite separar os componentes específicos, com base em seus tipos de resíduos. O BOS refere-se aos componentes não modulares de um sistema fotovoltaico, incluindo inversores, racks, cabos/fios, interruptores, gabinetes, fusíveis, detecção de falha de aterramento (GERTSAKIS; LEWIS, 2016).

Hoje, a maioria dos módulos EoL são dispostos em aterros sanitários, principalmente porque os processos de reciclagem de módulos fotovoltaicos ainda não são economicamente viáveis e a regulamentação na maioria dos países ainda não está bem estabelecida (LUNARDI et al., 2018). Atualmente, não há indicações suficientes sobre políticas para lidar com esses problemas.

Segundo Ovatt et al. (2021), os PV podem seguir variadas opções de circularidade (Tabela 2).



Opção Circular	Definição
Reciclar no estágio de fabricação	Pré-consumo, reciclagem de sucata industrial. O material entra neste ciclo de reciclagem devido às ineficiências de fabricação.
Reparo	Um módulo falhou e uma correção no local para o defeito ou problema do módulo é possível. Se o módulo não for reparado, presume-se que esteja em EoL. Se o módulo for reparado, continua gerando energia.
Revenda ou refinanciamento	Os proprietários do sistema concordam em produzir energia por um determinado período por meio de um PPA ou outro mecanismo contratual. Depois que o PPA expirar, o proprietário pode optar por manter o sistema operando além da garantia do módulo ou período de financiamento do projeto, se ainda estiver economicamente viável. Os proprietários do sistema continuam vendendo energia do sistema ou vendem o sistema. Isso representa o caso real de uso de sistemas fotovoltaicos sendo vendidos para continuar a operação após o término de um contrato de compra de energia (PPA), bem como vendas de módulos individuais no mercado secundário.
Reuso	O módulo está em EoL (por degradação ou fim do projeto) e está desmontado e retirado do campo. Externamente, o módulo é avaliado/testado/recertificado e encontrado em condições de funcionamento aceitáveis para ser vendido em um mercado secundário (talvez como sobressalente para um sistema semelhante) e é posteriormente instalado em um novo local.
Reciclar ao fim da vida útil (EoL)	Quando um módulo está em EoL e não é reutilizado, reparado, recondiçãoado ou enviado diretamente para um aterro sanitário, pode ser reciclado em seus materiais constituintes. Materiais reciclados de alta qualidade podem substituir materiais virgens na fabricação de novos módulos ou outros produtos (por exemplo, vidro plano para vidro de recipiente). Materiais reciclados de baixa qualidade podem ser reciclados em outros produtos com requisitos de qualidade de material menos rigorosos.

Tabela 2 – Opções circulares “R”.
Fonte: OVAITT et al. (2021).

Quando um sistema solar chega no final da sua vida útil, devem ser empregues ações para maximizar o reaproveitamento dos materiais nele presente, pois, ele continua sendo um produto de excelente valor agregado, do qual se consegue extrair, ainda, muitas utilidades. Cerca de 96% de um módulo fotovoltaico possui potencial de reciclabilidade (ABSOLAR, 2023).

No Brasil, a circularidade desses materiais pode ser observada nas atividades de empresas como a SunR, primeira organização especializada no seguimento (SUNR, 2023). De maneira geral, no procedimento de reciclagem, inicialmente, a companhia



realiza a coleta das placas solares inservíveis. Posteriormente, executa a desmontagem dos painéis. Durante essa etapa, são retirados: alumínio, vidro, polímero e uma combinação de metais (ABSOLAR, 2023).

O alumínio é encaminhado para indústria de fundição. O vidro que pode corresponder a pelo menos 70% da composição de uma placa, pode ser transformado em microesferas utilizadas em iluminação de rodovias. O plástico e demais materiais como as misturas metálicas: silício, prata, cobre e estanho, também recebem diferentes tratamentos adequados e são reaproveitados como matéria-prima secundária para novos materiais (ABSOLAR, 2023).

Considerado as opções de circularidades propostas por Ovaitt et al. (2021), a única que não pode ser aplicada em território brasileiro é a primeira, a qual a reciclagem é realizada no estágio de fabricação, essa opção se torna inexecutável pelo fato de não termos fabricantes em termos de materiais primários dos painéis solares em território brasileiro, inviabilizando a re inserção dos materiais reciclados na própria cadeia produtiva (ABSOLAR, 2023).

A energia solar é uma fonte renovável, limpa, sustentável e abundante, sendo esses os aspectos que mais beneficiam o meio ambiente (SOL+, 2023). Embora o investimento inicial possa ser mais elevado, os custos operacionais e de manutenção são significativamente menores do que as fontes de energia convencionais, como carvão e gás natural (HCC ENERGIA SOLAR, 2023). Porém, analisando todo o ciclo de geração, desde o processo de manufatura das placas até o final de sua vida útil, conclui-se que não é um processo limpo, pois a placa solar dispõe de uma vida útil limitada, gerando um acúmulo significativo de lixo, impactando diretamente na vida humana e ambiental no futuro, contradizendo a ideia de energia 100% limpa. As regulamentações nacionais são muito embrionárias e deixam margem para o não cumprimento das mesmas (GUIMARÃES et al., 2021). Nesse sentido, as opções de circularidade possibilitam dar uma destinação ambientalmente adequada aos painéis em fim de vida, reduzindo os impactos sociais, econômicos e ambientais.

Considerações Finais

Com base na crescente expansão do uso da energia solar, assim como sua capacidade instalada de geração fotovoltaica e considerando o aumento da geração de resíduos provenientes dessa atividade, o estudo apresentou opções de circularidade que visam a recuperação dos recursos, prolongamento do tempo de vida, a minimização de desperdício, as quais representam um impacto positivo substancial no meio ambiente. O estudo mostra que apesar das diversas opções circulares exploradas, como reparo, revenda e reutilização, atualmente nosso país pratica apenas a alternativa de ‘reciclagem ao final do ciclo de vida’ dos painéis. Sugere-se futuras investigações visando aprimorar a gestão desses resíduos, a valorização de seus componentes, assim como a redução de sua disposição em aterros sanitários.

Referências

ABSOLAR – Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Placas solares fotovoltaicas ajudam o meio ambiente até depois que viram lixo; entenda.** São



Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/placas-solares-fotovoltaicas-ajudam-o-meio-ambiente-ate-depois-que-viram-lixo-entenda/>. Acesso em: 05 ago. 2023.

ANSANELLI, G.; FIORENTINO, G.; TAMMARO, M.; ZUCARO, A. A Life Cycle Assessment of a recovery process from End-of-Life Photovoltaic Panels. **Applied Energy**, v. 290, 2021. DOI:10.1016/j.apenergy.2021.116727.

ANSELMO, A. H. **Reciclagem ou destinação final dos painéis fotovoltaicos aplicados em geração de energia ao final do ciclo de vida**. Monografia (Especialização em Fontes Renováveis). Belo Horizonte-MG: UFMG, 2019. 58p.

BARROS, M. V. et al. Circular economy as a driver to sustainable businesses. **Cleaner Environmental Systems**, v.2, 2021. DOI: <https://doi/10.1016/j.cesys.2020.100006>.

BIO INTELLIGENCE SERVICE. European Commission DG ENV. A project under framework contract ENV.G.4/FRA/2007/0067. Study on photovoltaic panels supplementing the impact assessment for a recast of the WEEE Directive. **FINAL REPORT**, 14 Apr. 2011. 86p.

CE- Circle Economy. The circular gap report 2023. **Circle Economy**, 2023. 39p.

CRAMER, J. **How Network Governance Powers the circular economy: Ten Guiding Principles for Building a circular economy**, Based on Dutch Experiences. 1. ed. Amsterdam: Economic Board, 2020. 176p. ISBN 978-90-90-33928-3.

CRAMER, J. The raw materials transition in the Amsterdam metropolitan area: Added value for the Economy, Well-Being, and the Environment. **Environment Science and Policy for Sustainable Development**, v. 59, n. 3, p. 14-21, 2017. DOI: 10.1080/00139157.2017.1301167.

CHOWDHURY, M. S.; KAZI, R. S.; CHOWDHURY, T.; NUTHAMMACHOT, N.; TECHATO, K.; AKHTARUZZAMAN, M.; TIONG, S. K.; SOPIAN, K.; AMIN, S. An overview of solar photovoltaic panels' end-of-life material recycling. **Energy Strategy Reviews**, v. 27, p. 100431, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.100431>.

DOI, T.; TSUDA, I.; UNAGIDA, H.; MURATA, A.; SAKUTA, K.; KUROKAWA, K. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method. **Sol. Energy Mater. Sol. Cells**, 2001, p. 397-403.

DOMINGUEZ, A.; GEYER, R. Photovoltaic waste assessment in Mexico. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 127, 2017, p. 29-41.

DOMINGUEZ, A.; GEYER, R. Photovoltaic waste assessment of major photovoltaic installations in the United States of America. **Renewable Energy**, v. 133, 2019, p. 1188-1120. DOI: 10.1016/j.renene.2018.08.063.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético Nacional (BEN) 2019: Ano base 2018, 2019**. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br> . Acesso em: 10 jul. 2023.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 ano base 2020**. Brasília: MME, 2021. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites->



pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio_2021.pdf. Acesso em: 09.09.2023.

GUIMARÃES, E. C.; LEMES, T. D. V. S.; COSTA, W. H. A.; REIS, A. K. C. Energia solar paradigmas e geração de resíduos. **Brazilian Journal of Development**, Curitiba, v. 7, n. 6, p. 59932-59940, jun. 2021.

HCC ENERGIA SOLAR. **Conheça os benefícios econômicos da energia solar.** 29.03.2023. Disponível em: <https://hccenergiasolar.com.br/beneficios-economicos-da-energiasolar/#:~:text=Uma%20das%20principais%20vantagens%20da,como%20carv%C3%A3o%20e%20g%C3%A1s%20natural>. Acesso em: 09.09.2023.

IRENA; IEA-PVPS. **End-of-Life Management: Solar Photovoltaic Panels**; USDOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (EERE), Solar Energy Technologies Office (EE-4S): Washington, DC, USA, 2016.

IRENA – International Renewable Energy Agency. **Panorama das Transições Energéticas Mundiais 2022**: Voia do 1,5°C, Agência Internacional para as Energias Renováveis, Abu Dhabi. 20p.

JAYAWARDENA K.D.G.I., ROZANSKI L.J., MILLS C.A., BELIATIS M.J., NISMY N.A., SILVA S.R.P. ‘Inorganics-in-Organics’: Recent developments and outlook for 4G polymer solar cells. **Nanoscale**, 5, pp. 8411–8427, 2013. doi: 10.1039/c3nr02733c.

KANG, S; YOO, S.; LEE, J.; BOO, B.; RYU, H. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules. **Renewable Energy**, v. 47, Nov. 2012, pp. 152-159. DOI: 10.1016/j.renene.2012.04.030.

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M.P. Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. **SSRN Electron**. 2017. DOI: 10.2139/ssrn.3037579.

LATUNUSSA, C.E.; ARDENTE, F.; BLENGINI, G.A.; MANCINI, L. Life Cycle Assessment of an innovative recycling process for crystalline silicon photovoltaic panels. **Sol. Energy Mater. Sol. Cells**, 2016, p. 101–111.

LUNARDI, M. M.; ALVAREZ-GAITAN, J. P.; BILBAO, J. I.; CORKISH, R. Comparative Life Cycle Assessment of End-of-Life Silicon Solar Photovoltaic Modules. **Appl. Sci**. 2018. DOI: 10.3390/app8081396.

MAHMOUDI, SAJJAD; HUDA, NAZMUL; BEHNIA, MASUD. Photovoltaic waste assessment: Forecasting and screening of emerging waste in Australia. **Resources, Conservation & Recycling**, v. 146, p. 192-205, 2019.

MOURA, A. M. M.; ROMA, J. C.; SACCARO JÚNIOR, N. L. Problemas econômicos, soluções ambientais. **Boletim Regional, Urbano e Ambiental**, 2016.

NEXO JORNAL LTDA. **O crescimento da energia solar no Brasil. E o seu futuro. 2023.** Disponível em: <https://www.nexojornal.com.br/expresso/2022/09/29/O-crescimento-da-energia-solar-no-Brasil.-E-o-seu-futuro>. Acesso em: 17.07.2023.

NKUISSI, H. J. T.; KONAN, F. K.; HARTITI, B.; NDJAKA, J.M. **Toxic Materials Used in Thin Film Photovoltaics and Their Impacts on Environment.** In: GOK, A.



Reliability and Ecological Aspects of Photovoltaic Modules, [Internet]. IntechOpen; 2020. DOI: 10.5772/intechopen.82613.

ÓRIGO ENERGIA. **A história da energia solar no Brasil**. 2020. Disponível em: <https://origoenergia.com.br/blog/energia/a-historia-da-energia-solar-no-brasil/>. Acesso em: 17 jul. 2023.

OVAITT, S.; MIRLETZ, H.; SEETHARAMAN, S.; BARNES, T. PV in the circular economy, a dynamic framework analyzing technology evolution and reliability impacts. **Iscience**, v. 25, 2022. DOI: 10.1016/j.isci.2021.103488.

PADOAN, F. C. S. M.; ALTIMARI, P.; PAGNANELLI, F. Recycling of end of life photovoltaic panels: A chemical prospective on process development. **Solar Energy**, v. 177, p. 746-761, 2019.

PAIANO, A. Photovoltaic waste assessment in Italy. **Renew. Sustain. Energy Rev.**, 2015, p. 99-112.

PARK, J.; PARK, N. Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules. **RSC Adv**. 2014, p. 34823–34829.

REH, L. Process engineering in circular economy. **Particuology**, v. 11, n. 2, p. 119-133, 2013. DOI: 10.1016/j.partic.2012.11.001.

SOL+. Benefícios ambientais, econômicos e sociais da energia solar! 04.04.2023. Disponível em: <https://solmais.com.br/blog/beneficios-ambientais-economicos-e-sociais-da-energia-solar/>. Acesso em: 09.09.2023.

STEINER, K. H. **Estudo sobre o impacto ambiental decorrente da utilização e descarte de placas fotovoltaicas**. Trabalho de Conclusão de Curso. Programa de Graduação em Engenharia Elétrica. Tubarão: UFSC, 2020. 47p.

VAN LOON, P., DIENER, D., HARRIS, S. (2021). Circular products and business models and environmental impact reductions: current knowledge and knowledge gaps. **J. Clean. Prod.** 2021. DOI: 10.1016/j.jclepro. 2020.125627.

XU, Y.; LI, J.; TAN, Q.; PETERS, A. L.; YANG, C. Global Status of Recycling Waste Solar Panels: A Review. **Waste Management**, v. 75, 2018, p. 450-458.

ZHU, Q; GENG, Y; LAI, K. Circular economy practices among Chinese manufacturers varying in environmental-oriented supply chain cooperation and the performance implications. **Journal of environmental management**, v. 91, n. 6, p. 1324-1331, 2010. DOI: 10.1016/j.jenvman.2010.02.013.



ORÇAMENTO EMPRESARIAL APLICADO A LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Thiago Thiago Dai Prá Silva/UNISINOS - ThiagoSilva7@edu.unisinis.br; Lisiane Kleinkauf da Rocha/UNISINOS; Kátia Ocanha Dorneles/Unisinis; Carlos Alberto Mendes Moraes/UNISINOS

Resumo

Os resíduos eletrônicos têm se tornado cada vez mais um problema complexo a ser resolvido e ao mesmo tempo muitas oportunidades se criam com a matriz contida dos elementos estratégicos presentes nos REEE. Para gerir a operação de logística reversa de REEE em nome de marcas, importadores e distribuidores e comércio tem sido disponibilizado pontos de coleta voluntário para o REEE pós-consumo, realizar a logística dos resíduos, desmontar, descaracterizar e valorizar os materiais os REEE e destinar cada parte à devida reciclagem. Esse trabalho tem o objetivo de mensurar financeiramente as tais operações citadas, e assim construir ponto de equilíbrio da operação de logística reversa de equipamentos eletrônicos. Pode servir como ferramenta de gestão financeira para cooperativas e outras entidades jurídicas prestadoras dos serviços necessários para logística reversa de REEE. O orçamento empresarial é uma ferramenta utilizada na gestão estratégica a fim de prever as movimentações financeiras e as demandas ou ociosidade de capital em caixa.

Palavras-chave: Orçamento Empresarial, REEE, Ponto de Equilíbrio, logística reversa.

1. Introdução

A estimativa de geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) no mundo, em 2019, foi de mais de 54 mil toneladas, isso se deve ao fato dos consumidores descartarem seus equipamentos mesmo quando passível de recuperação, além do grande descarte motivado quando lançado uma nova versão de seu equipamento (BERNARDES, 2022). Visando uma solução para o problema de gerenciamento de REEE, em 2010 no Brasil foi promulgada a lei a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que incluiu como um instrumento o acordo setorial de Logística Reversa de REEE regulamentado pelo Decreto 10.240 de fevereiro de 2020 criando organizações para se responsabilizarem pela Logística Reversa de REEE em nome de Fabricantes, Importadores, distribuidores e comerciantes. A Green Eletron (2023) vem atuando para construir uma possibilidade de *feedstock* de elementos estratégicos para a indústria de componentes eletrônicos como forma alternativa para a falta de fornecimento de matéria prima.

Este trabalho aborda o conceito de orçamento empresarial aplicado a logística reversa de REEE. Ele propõe auxiliar a mensuração de esforços para determinada operação, a partir do armazenamento de informações resultantes de operações



recentemente executadas. No caso deste tema, inclui as empresas responsáveis por coletar e destinar ambientalmente correto os REEE. O fluxo financeiro referente a todo o sistema de movimentação dos resíduos que engloba a operação foi listado no Orçamento Logístico, foram considerados coletas em pontos de entrega voluntários, em empresas e em escolas para quantificar o esforço. A mensuração da descaracterização dos REEE manualmente foi considerada como orçamento de produção da Logística Reversa de REEE. Por se tratar de uma atividade de grande relevância, para possibilitar o *feedstock* de elementos estratégicos na indústria de semicondutores. Araujo (2020) estudou alternativa para reduzir a pressão pelo fornecimento de matéria prima extraída da natureza e também rota de reciclagem mais rentável para equipamentos da linha verde. Com esses dados organizados sistematicamente foi possível a criação de equação para garantir a segurança financeira da operação de Logística Reversa de REEE.

2. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é o estudo de caso dos fluxos financeiros da logística reversa de REEE. Como objetivos específicos apresentar aplicar a ferramenta Orçamento Empresarial na análise financeira; e apresentar equação para atingimento de ponto de equilíbrio da operação de logística reversa de REEE.

3. Metodologia

No âmbito teórico foram realizadas pesquisas bibliográficas dos conceitos apresentados nesse estudo, consultas em órgãos governamentais responsáveis pelas leis trabalhistas e acordo sindicais que se apliquem a operação de descaracterização dos REEE.

Para quantificar os fluxos financeiros, foram utilizadas informações de duas empresas, ambas responsáveis por coletar, descaracterizar e destinar ambientalmente correto os REEE.

4. Resíduos Eletrônicos

O crescimento da fabricação de dispositivos eletrônicos com inteligência artificial (IA) é notória. Carros, máquinas de lavar, geladeiras e até casas estão sendo ligadas em dispositivos eletrônicos para que possam ter conexão externa e acesso remoto. O aumento no consumo de produtos eletrônicos para serviços home office também é muito significativo, principalmente durante e pós pandemia (BERNARDES ET AL, 2023). Conforme o site da recicladora Igneo (2023), a cada ano são produzidos 50 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos.

São denominados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) todo aparelho eletrônico que quando descartados são passíveis de reciclagem. Para o REEE virar insumos para novos produtos é necessária uma cadeia de reciclagem que conta com diferentes *stakeholders* atuando em diferentes níveis do processo. Estes podem ser:



indústrias, empresas diversas, organizações que interagem diretamente com os consumidores finais, escolas, gestores ou acumuladores de resíduos eletrônicos, atacado de recicláveis e indústrias de beneficiamento, entre outros. Ou seja, todos que interagem de alguma forma com equipamentos eletrônicos podem ser considerados *stakeholders* nessa cadeia

5. Logística reversa de REEE

Pode-se considerar logística reversa como alternativa para fornecimento de materiais estratégicos através da mineração urbana, principalmente se tratando de REEE que são compostos por matérias críticas e de difícil extração natural. (ARAUJO, 2020).

De acordo com Bernardes *et al* (2022), visando uma solução para o problema de gerenciamento de REEE no Brasil, foi definido por lei, em 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos-PNRS que originou o acordo setorial de Logística Reversa de REEE atualmente regulamentado pelo Decreto 10.240 de fevereiro de 2020. Assim foram criadas entidades para se responsabilizarem pela operação que inclui a coleta dos REEE e sua destinação para reciclagem em nome de fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes (GREEN ELETRON, 2023).

No sentido de ampliar a discussão sobre a logística reversa dos REEE no Brasil, a luz das práticas em demais países, principalmente na União Européia e Canadá, passa-se a considerar, segundo Xavier (2021), a Responsabilidade Estendida do Produtor (REP), também um instrumento previsto na Lei 12305. Segundo uma definição revisada de Lindqvist (2000), ela é um princípio para promover melhorias ambientais do ciclo de vida total dos sistemas de produtos, alargando as responsabilidades do fabricante, montadores, marcas e importadores do produto às várias partes de todo o ciclo de vida e, especialmente, ao retorno, pela reciclagem como forma de desviar da disposição final do produto em aterro industrial.

6. Orçamento Empresarial

Segundo Padoveze (2009), orçamento empresarial é a expressão quantitativa de um plano de ação, caracterizado como modelo de programação de atividade. É composto por uma série de orçamentos que ao final além da demonstração dos objetivos em números traz para a empresa uma série de análises para tomada de decisão. Uma operação complexa como a Logística Reversa de REEE traz consigo a necessidade de controle e mensuração de esforços para melhor utilização dos recursos disponíveis por gerenciadores para operacionalizar a Logística Reversa de REEE.

Kumari (2022) traz que a descaracterização dos REEE é de grande relevância para a interação entre processos de reciclagem das diferentes partes que compõem esse tipo de resíduo. Essa integração de processos é essencial para a viabilidade de maior número de elementos sendo recuperados e maiores taxas de recuperação destes elementos. Com mais



elementos sendo recuperados através da Logística reversa de REEE maior é a capacidade de geração de Receita da operação, minimizando as despesas existentes.

6.1 ORÇAMENTO DE PRODUÇÃO

De acordo com Zdanowicz (1998), em uma empresa que trabalhe com prestação de serviço, o orçamento de produção é medido pelas despesas envolvendo mão de obra, dividida pelo tempo gasto no processo inteiro. Existindo dois tipos de despesas, classificadas como indiretas e direta:

- Indiretas: custo de deslocamento, custo de alimentação;
- Direta: valor da mão de obra, benefícios, encargos.

São das obrigações das empresas, de acordo com a lei trabalhista nº 5.452 (CLT), e demais convenções coletivas de trabalho quanto a contratação de colaboradores para a realização da atividade de descaracterização de REEE: o (1) fornecimento de Equipamento de Proteção Individual; (2) custear o deslocamento do colaborador de sua residência até o local de trabalho, variando de acordo com cada colaborador podendo as empresas descontar 6% relativo ao salário base cabendo ao colaborador a decisão de utilizar ou não o benefício; (3) pagamento do direito social chamado décimo terceiro salário no valor de uma décima segunda parte da soma de todos os pagamentos de salário do ano; (4) financiar o fundo de garantia do tempo de serviço patronal com contribuição mensal de 20% do gasto com remuneração do colaborador; (5) repassar verba ao Instituto Nacional do Seguro Social e Imposto de Renda, valor conforme tabela imposta pelo governo atual; (6) pagamento do salário base e a cada 12 pagamentos o colaborador tem direito a descanso remunerado.

Não é de obrigação legal fornecer alimentação aos colaboradores, porém a maioria das empresas opta por pagar um valor a fim de facilitar a alimentação do colaborador, ou em fornecer refeições no local de trabalho. Desse valor pago, até 20% do colaborador pode ser descontado na fonte.

O adicional ocupacional sobre descaracterização de REEE não está definido por lei, mas cabe a empresa o bom senso na condição de trabalho dos seus colaboradores. O manuseio de ferramentas elétricas não caracteriza como grau mínimo para pagamento do adicional. A tabela 01 ilustra o cálculo com exemplo de remuneração bruta do colaborador de 2.000,00 reais mensais. Os valores foram repassados por uma das empresas estudadas.



Salário	R\$ 2.000,00				
13°	R\$ 166,67				
Insalubridade	R\$ 200,00	10%			
Transporte	R\$ 280,00	R\$ 400,00	6%		
Alimentação	R\$ 320,00	R\$ 400,00	20%	R\$ 18,18	22
EPI	R\$ 15,00				
	R\$				
Subtotal recurso	2.981,67				
INSS patronal	R\$ 596,33				
	R\$				
Despesa mensal	3.578,00				

TABELA 1 – Despesa com Mão de obra

Fonte: Autoria própria, 2023.

6.2 ORÇAMENTO DE LOGÍSTICA

Para Padoveze (2009), devem ser considerados todas as despesas, custos e investimentos relativos ao transporte de materiais prontos, movimentação interna e sistema de armazenamento para a formação do orçamento de logística. As movimentações financeiras que envolvem compra de equipamentos de transporte e suas obrigações referentes a propriedade, seguros e manutenções, despesas com motoristas e ajudantes, combustíveis para deslocamento entre outras. O autor também coloca o orçamento de logística como limitador do orçamento de produção quando existe dependência de insumos ou produtos. Conforme Cugula (2020) e Araujo (2020), a distância entre os pontos de coleta e os gerenciadores de resíduos interfere diretamente no custo de operacionalização da Logística Reversa de REEE. Disponibilizar um veículo e colaboradores para realizar a operação logística em certas situações se torna inviável financeiramente, porém uma alternativa trazida pelo autor Oliveira Neto (2023) é a utilização de empresas de logística de resíduos terceiros para realizar essa etapa.



O cálculo referente ao orçamento logístico pode ser dividido em duas partes. Primeiramente tem-se o deslocamento que considera a distância do local da coleta multiplicado pela média de consumo de combustível do veículo também multiplicado pelo preço do combustível e a mão de obra envolvida durante a coleta, utilizando-se do mesmo cálculo realizado no orçamento de produção multiplicado pelo tempo e assim com a soma desses dois fatores se constrói o custo direto de logística. Em seguida tem-se a média de despesas indiretas, que são resultado da soma do investimento relativo a compra de veículo, as manutenções corretivas, as manutenções preventivas, o imposto pago pela propriedade do veículo divididas pelo número de coletas possíveis a ser realizadas.

Existe também o esforço logístico de deslocamento dos materiais pós descaracterização, como descreve Cugula (2020), esses materiais recicláveis são destinados para indústrias de recuperação de elementos, onde se geram receitas oriundas da operação de logística reversa de REEE. A distância do local de descaracterização até as indústrias também é fator variável na composição do orçamento de logística reversa.

6.3 ORÇAMENTO DE DESPESAS DEPARTAMENTAIS

Segundo Lerche (2012), para a criação do orçamento de despesas departamentais primeiramente deve ser criado um orçamento de cada setor da empresa. Todos os lançamentos comuns às áreas devem estar citados no orçamento de despesas departamentais, principalmente as saídas financeiras indiretas ao produto fim, como: conta de água, conta de luz e conta de internet.

Perochin (2010) traz que as despesas não precisam ser rateadas com o mesmo peso para todos os setores. Algumas despesas são consumidas apenas por alguns setores ou consumidas mais por uns do que por outro. Segue na tabela 2, exemplo de empresas estudadas, que deu maior peso para a conta “Aluguel” nos setores de Logística e Produção, por ocuparem uma maior área física das instalações da empresa, já na conta “Contabilidade” são considerados de maior peso os setores Administrativo, Recursos Humanos e Departamento Pessoal.



Despesas departamentais		ADM	Logística	Produção	Recursos Humanos	Departamento Pessoal	Marketing	Controladoria
Aluguel	R\$ 3.500,00	R\$ 350,00	R\$ 875,00	R\$ 875,00	R\$ 350,00	R\$ 350,00	R\$ 350,00	R\$ 350,00
Ferramentas	R\$ 300,00			R\$ 300,00				
Veículo	R\$ 1.500,00			R\$ 750,00			R\$ 750,00	
Contabilidade	R\$ 1.000,00	R\$ 300,00	R\$ 10,00	R\$ 10,00	R\$ 110,00	R\$ 210,00	R\$ 10,00	R\$ 250,00
Advogado	R\$ 300,00	R\$ 20,00	R\$ 20,00	R\$ 20,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 20,00	R\$ 20,00
Luz	R\$ 500,00	R\$ 55,56	R\$ 55,56	R\$ 166,67	R\$ 55,56	R\$ 55,56	R\$ 55,56	R\$ 55,56
Água	R\$ 60,00	R\$ 8,57	R\$ 8,57	R\$ 8,57	R\$ 8,57	R\$ 8,57	R\$ 8,57	R\$ 8,57
Alvarás/Licenças/PCI	R\$ 200,00		R\$ 100,00	R\$ 100,00				
Móveis	R\$ 100,00	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29
Air condicionado	R\$ 10,00	R\$ 1,43	R\$ 1,43	R\$ 1,43	R\$ 1,43	R\$ 1,43	R\$ 1,43	R\$ 1,43
Bags	R\$ 60,00			R\$ 60,00				
Impressora	R\$ 15,00	R\$ 5,00			R\$ 5,00	R\$ 5,00		
TI	R\$ 100,00	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29	R\$ 14,29
Total	R\$ 7.645,00							

TABELA 1 – Despesa com Mão de obra

Fonte: Autoria própria, 2023.

8. Controles e avaliações

Neste item são discutidas as questões relativas a duas ferramentas básicas de gestão financeira, utilizadas para avaliação, controle e tomada de decisão empresarial.

8.1 PONTO DE EQUILÍBRIO

Para Alves et al (2020), o cálculo de ponto de equilíbrio indica o quanto de entradas financeiras são necessárias para cobrir todas as saídas financeiras necessárias para a operação da empresa, esse valor pode ser expresso também em quantidade de produtos ou serviços. Somam-se todas as saídas diretas e indiretas listadas nos orçamentos citadas anteriormente nesse trabalho.



Equação (adaptada à desmontagem de REEE):

- o $(\text{Item 1 qtd. (Kg)} \times \text{tempo de desmontagem item 1} + \text{Item 2 qtd. (Kg)} \times \text{tempo de desmontagem item 2...}) \times \text{Despesa operacional} + \text{Km} \times \text{Custo logístico} + \text{Departamentais} = \text{valor de receita necessário para alcançar ponto de equilíbrio da operação de Logística Reversa REEE.}$

8.2 FLUXO DE CAIXA

Diferentemente do cálculo de ponto de equilíbrio a análise de fluxo de caixa inclui a variável de “quando” o montante será desprendido para pagamento, analisando assim o momento que a empresa necessitará estar preparada. A operação de logística reversa de REEE, conforme uma das empresas estudadas ao final de cada mês com a despesa de mão de obra, aumenta a necessidade de caixa assim como no mês de pagamento do décimo terceiro salário referente ao ano fiscal. Segundo Friedrich, a análise de fluxo de caixa possibilita projetar as movimentações de relevância que ocorrerão ao longo do ano. Ressalta também que as informações transcritas precisam demonstrar a realidade da empresa, para que os dados retirados da análise sejam confiáveis.

A análise de fluxo de caixa na logística reversa de REEE se torna de extrema importância pois, segundo as duas empresas estudadas, os valores e viabilidade de comercialização dos recicláveis depende de volume de material estocado a ser comercializado, necessitando assim meses de operação para formação de lotes passíveis para esta comercialização.

9. Conclusão

Um fator não considerado sobre a logística reversa de REEE que deve ser levado em conta nas avaliações financeiras é a capacidade de captação de recursos naturais que podem ser utilizados como matéria prima na produção de novos equipamentos, assim reduzindo custos de aquisição de matéria prima nova oriunda de fontes de recursos naturais não renováveis. Do valor pago em relação a mão de obra, principal despesa do orçamento de produção, pode-se afirmar que 44% do valor gasto refere-se a carga tributária e benefícios trabalhistas.

No caso da operação de logística reversa de REEE, quando monetizada apenas pela venda de recicláveis, as análises sugeridas neste trabalho se tornam de extrema importância, pois haverá entradas financeiras apenas após vários meses de execução das atividades de operação da empresa, cabendo ao gestor o desafio de firmar todas suas obrigações financeiras. A responsabilidade estendida do produtor torna de responsabilidade das empresas fabricantes, importadoras e distribuidoras a responsabilidade de gerenciamento dos seus resíduos, dessa forma, esses *stakeholders* devem investir na etapa de coleta, desmontagem e triagem de REEE apoiando



cooperativas de REEE e recicladoras que já atuam no mercado de gerenciamento de REEE, ajudando a financiar suas operações logísticas, por exemplo.

Fica claro que para garantir uma recuperação dos materiais presentes nos REEE, não se pode apenas considerar os ganhos ambientais e sociais, que são claros no que tange os conceitos de mineração urbana dentro da perspectiva da produção mais limpa e responsável; mas há de serem considerados aspectos financeiros de toda a cadeia produtiva e de reciclagem para garantir sua viabilidade no Brasil. Para que a Logística Reversa ocorra é necessário que várias organizações atuem em conjunto. Pode-se fazer uma analogia aos elos de uma corrente, cada stakeholder seria um elo. Se todos estão fortes, a corrente é forte e resistente. Onde um elo está fraco, a corrente pode se romper. Dessa forma, é de suma importância a sustentabilidade financeira dos negócios que fazem parte dessa cadeia produtiva.

10. Referências

ALVES, Eduardo; GRANERO, Guilherme, HAUCK, Róger Moreira, LEAL, CORDERO Aletéia. **Estudo de caso em uma indústria calçadista de Franca/SP**. Create – Revista das Engenharias. Volume. 3 N°1 – 2020

ARAUJO Raissa; OTTONI, M. and XAVIER L.H., "**Analysis of e-waste voluntary delivery points (VDP) location in the city of Rio de Janeiro Brazil**" in 5th Symposium on Urban Mining and Circular Economy- SUM, Bologna, Italy:press, 2020.

BERNARDES, Andréa Moura et al. **Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic**. Elsevier. 30 jul. 2022. Disponível em: <https://www.journals.elsevier.com/cleaner-waste-systems>. Acesso em: 10 maio 2023.

CUGULA, Jéssica; APOLONIO, Luca; ARAUJO, Raissa; OTTONI, Marianna; XAVIER, Lúcia. **E-waste hotspots and best routes analysis for reverse logistics in the city of são paulo, brazil**. In: **5th symposium on urban mining and circular economy**, 5., 2020, Venice. Artigo. Vanice: Cisa Publisher, 2020.

GREEN ELETRON. **A Política Nacional de Resíduos Sólidos, uma década depois. 2023**. Disponível em: <https://greeneletron.org.br/blog/a-politica-nacional-de-residuos-solidos-uma-decada-depois/>. Acesso em: 30 jun. 2023.

IGNEO RECYCLING. Disponível em - <https://www.igneo.com/> - Acessado em em julho de 2023.

KUMARI Rima, SAMADDER SR. **A critical review of the pre-processing and metals recovery methods from e-wastes**. Journal of Environmental Management. Vol. 320. Elsevier.2020

LERCHE, Angela; AZEVEDO, Marcelo. **Planejamento financeiro para tomada de decisão**. Revista Análise, vol. 12 nº 19. Unianchieta. 2013.



LINDHQVIST, Thomas. **Extended Producer Responsibility in Cleaner Production: Policy Principle to Promote Environmental Improvements of Product Systems.** [Doctoral Thesis (monograph), The International Institute for Industrial Environmental Economics]. IIIIEE, Lund University. 2000

OLIVEIRA NETO, Geraldo Cardoso de et al. **Reverse Chain for Electronic Waste to Promote Circular Economy in Brazil: a survey on electronics manufacturers and importers.** 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/5/4135>. Acesso em: 5 jun. 2023.

PADOVEZE, Clóvis Luís; TARANTO, Fernando Cesar. **Orçamento empresarial: novos conceitos e técnicas**, 1º Edição. São Paulo: Ed. Personal Education, 2009

PEROCHIN, Graziela – **Planejamento orçamentário para uma empresa prestadora de serviços.** Disponível em <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/5921>; Acessado em junho/2023.

XAVIER, Lúcia Helena, OTTONI Marianna, LEPAWSKY, Josh. **Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks.** Journal of Cleaner Production. Vol. 297. Elsevier, 2021.

ZDANOWICZ, José Eduardo. **Planejamento financeiro e orçamento.** 2º Edição. Porto Alegre: Ed. Sagra Luzzatto, 1998.



ORGANIZAÇÕES DE CATADORES E LOGÍSTICA REVERSA DE REEE: OBSTÁCULOS PARA A INTEGRAÇÃO

Luciana Harue Yamane^{1*}; Renato Ribeiro Siman¹; Lorena Miossi Alves Cabral¹
¹Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (LAGESA) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)
* luciana.yamane@ufes.br

Resumo

A indústria eletrônica é uma das que mais cresce no mundo, e conseqüentemente, a geração de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) vem aumentando, sendo a categoria de resíduos sólidos que mais cresce globalmente. O gerenciamento de REEE envolve a implantação de sistemas de logística reversa (SLR). No Brasil, o SLR de REEE foi determinado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos e regulamentado pelo Decreto Federal nº10.240/2020, que prevê a inserção das organizações de catadores de materiais recicláveis (OCMRR) no SLR. No entanto, apesar desta previsão legal, a inclusão das OCMRR enfrenta diversas dificuldades, sendo consideradas nesta pesquisa como disfunções, que podem ser de ordem econômica, legal, social e ambiental. Dessa forma, o objetivo deste artigo foi identificar e categorizar as disfunções para a inclusão das OCMRR no SLR de REEE por meio de revisão sistemática da literatura. Observou-se que as disfunções econômicas identificadas foram falta de gestão; de infraestrutura; resistência das empresas em integrarem os SLR de REEE; concorrência e desvios de REEE. Já as disfunções legais foram a dificuldade das OCMRR em atender os requisitos legais. As de ordem social, falta de capacitação; dificuldade de regulamentar as OCMRR; falta de conscientização da população; falta de reconhecimento, de inclusão social, conforme a PNRS. E a ambiental, como contaminação solo, água e danos à saúde, em especial dos catadores, que manuseiam estes resíduos.

Palavras-chave: Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos; Catadores; Logística Reversa.

1. Introdução

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) vem crescendo a uma taxa anual de 3% a 5% ao ano, sendo que em 2019, foram gerados 53,6 milhões de toneladas no mundo, e o seu gerenciamento vem causando uma preocupação, devido ao aumento da geração, riscos à saúde e meio ambiente, associados ao seu manuseio, descarte e reciclagem inadequados (FORTI *et al.*, 2020).

O Brasil foi um dos primeiros países da América Latina a estabelecer um marco regulatório abrangente em âmbito federal, para embasar a regulamentação da gestão de REEE, que foi a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal nº 12.305,



de 2 de agosto de 2010 (GHISOLF *et al.*, 2017). Em 2019 foi assinado um Acordo Setorial para implantação do SLR de Produtos Eletroeletrônicos de usos doméstico e seus componentes, e posteriormente publicado o Decreto Federal nº10.240, de 12 de fevereiro de 2020, que regulamentou a implementação deste sistema.

O Decreto estabeleceu normas para a implementação e estruturação do SLR obrigatório de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes, estabelecendo as etapas do gerenciamento, como descarte, recebimento, armazenamento, transporte e destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2020).

No entanto, a operacionalização do SLR de REEE no Brasil enfrenta diversos desafios, segundo os autores Valente *et al.* (2021) e Demajorovic *et al.* (2016), como: ausência de infraestrutura para o gerenciamento adequado de resíduos; custo dispendioso da cadeia logística gerando resistência do setor industrial; o quantitativo de REEE gerado superior a infraestrutura existente; a exportação ilegal de REEE; a toxicidade de alguns REEE é desconhecida ou negligenciada; peças ou componentes de REEE com potencial de reciclagem frequentemente misturados com os resíduos sólidos urbanos e descartados em “lixões” ou aterros sanitários; o conhecimento da população em geral sobre os impactos à saúde humana e ao meio ambiente em relação ao descarte inadequado ainda é deficiente; necessidade de atribuição clara dos papéis de cada ator da cadeia de produção, distribuição e venda no SLR de REEE; ausência de regulamentação envolvendo questões fiscais e tributárias; e, a inserção das organizações de catadores de materiais recicláveis e reutilizáveis (OCMRR) na cadeia logística, quando há previsão legal.

Um exemplo de previsão legal para a inserção das OCMRR está no Decreto Federal nº10.240/20 em seu Capítulo X, Artigo 37, o qual prevê a inserção das OCMRR nas etapas de coleta, triagem e desmontagem (BRASIL, 2020). Porém, na prática, a inserção das OCMRR ainda não se consolidou, pois as próprias organizações possuem algumas disfunções de forma geral a serem sanadas, tais como ausência de estrutura física adequada para o acúmulo dos resíduos sólidos separados; formalização; distância entre as organizações de catadores e as indústrias de reciclagem; falta de convênios entre organizações, empresas (grandes geradores) e as indústrias; falta de capacitação no manejo dos REEE considerando os equipamentos de proteção individual, questões de segurança e saúde (VALENTE *et al.*, 2021; GHISOLF *et al.*, 2017).

No entanto, catadores de materiais recicláveis têm se organizado ao redor do mundo em cooperativas e/ou associações, isoladamente ou em redes, mas sempre formando empreendimentos quase sempre autogestionários e com propósitos semelhantes entre seus membros, com o objetivo de trazer benefícios nos aspectos sociais, econômicos e ambientais, e abrindo oportunidades (SIMAN *et al.*, 2020).

As OCMRR formalizadas permitem uma melhor condição de trabalho aos catadores, bem como a busca por direitos e deveres, melhorias nas atividades de coleta, triagem e comercialização dos materiais, implantação de um modelo de negócio, e possibilidade de treinamento (SIMAN *et al.*, 2020). Esta regularização também representa um modelo econômico alternativo, baseado na economia solidária e social, já que uma parte representativa dos catadores vivem em situação de vulnerabilidade (YAMANE *et al.*, 2023).



Assim, os catadores podem ser um dos principais atores na circulação dos REEE, fazendo a coleta, armazenamento, triagem, desmantelamento, reparações e comercialização (ALI *et al.*, 2022).

Contudo, os catadores organizados, após passarem por processo de capacitação e treinamento, tornam-se aptos a coletar, separar e desmontar os REEE, de forma a destinar materiais recicláveis, já que a formalização por si só não é suficiente para integrá-los nesta cadeia de resíduos (VALENTE, 2021; DIAS *et al.*, 2018).

Mas representam uma nova oportunidade no mercado de REEE para aumentar a renda, porém, este mercado ainda é incerto no Brasil (FERREIRA *et al.*, 2019). Shittu *et al.* (2021) concordam que as OCMRR poderiam atuar desde a coleta, transporte, recepção, desmontagem e pesagem (quando ocorre), e a segregação por tipo, e para seu manejo e desmonte, mas que demanda atenção àqueles equipamentos ou componentes que contenham substâncias nocivas à saúde dos trabalhadores, reforçando que para tal atividade é necessária a capacitação técnica.

Neste sentido, Ferreira *et al.* (2022) ressaltam em seu estudo que as empresas não possuem parcerias com as OCMRR, e que estas não têm capacidade técnica para lidar com o segmento eletrônico, dada a complexidade do material. Segundo Dias *et al.* (2018), a participação de catadores na coleta de REEE no país não é tão representativa quanto no caso de outros materiais, tais como as sucatas metálicas, sendo o método de coleta mais comumente empregado pelos recicladores formais o recebimento dos REEE diretamente das empresas parceiras ou clientes.

Diante do exposto, esse artigo procurou preencher a seguinte lacuna: quais as disfunções impedem a inserção das OCMRR nos SLR de REEE? Assim, o objetivo deste estudo foi identificar e categorizar as disfunções relacionadas à inserção das OCMRR no SLR de REEE, em especial no Brasil, e que podem acrescentar valor a este fluxo de resíduos.

2. Metodologia

Utilizou-se como ferramenta metodológica a revisão sistemática da literatura para a pesquisa bibliográfica de artigos publicados em periódicos nacionais e internacionais, com dados disponíveis nas bases *Scopus* (Elsevier) e *Web of Science* (coleção principal), bem como aqueles disponibilizados no portal de periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

A pesquisa foi delimitada no período de 2015 a 2022, e foram utilizados os seguintes termos de busca e restritores booleanos: "e-waste" OR "weee" OR "waste electrical" OR "waste electronic" OR "waste electrical and electronic equipment" AND "management" AND "reverse Logistics" AND "waste pickers" OR "scavengers" OR "recyclable material collectors" OR "scrap pickers" OR "garbage picker" OR "trafficker" OR "informal pickers" OR "formal pickers" OR "waste pickers organization" AND "barriers" OR "challenges" OR "dysfunctions" OR "opportunities".

Assim, os dados secundários provenientes das pesquisas foram identificados as disfunções, as quais foram categorizadas em disfunções "econômicas", "legais", "sociais", e "ambientais", a serem apresentadas no tópico desenvolvimento.



3. Resultados e Discussão

As disfunções encontradas em relação ao SLR de REEE serão discutidas separadamente nos tópicos a seguir.

3.1 Disfunções Econômicas

As disfunções econômicas identificadas na revisão sistemática da literatura foram destacadas nos tópicos abaixo.

3.1.1 Falta de gestão

Com a inserção de REEE nas OCMRR, haverá um aumento de materiais para recebimento e triagem, o que aumentará a demanda, e a grande maioria destas há carência de gestão (DEMAJOROVIC *et al.*, 2016). No entanto, as OCMRR não possuem gestão profissional e estrutura jurídica, o que dificulta a emissão de notas fiscais, e parcerias com as empresas e indústrias recicladoras, sendo que muitas indústrias, empresas desconhecem sobre a realidade das OCMRR (DEMAJOROVIC *et al.*, 2016).

Kasper (2022) identificou que parcerias realizadas com entidades gestoras obrigam as OCMRR a realizarem relatórios de prestação de contas de todo material coletado, triado e comercializado, e para isto precisa ter uma gestão administrativa eficaz.

De Oliveira *et al.* (2020) comparou duas OCMRR, sendo que a que não tinha uma gestão administrativa, teve dificuldades em triar os REEE. Outro fator observado por esses autores, é que o processamento efetuado por essas organizações para retirarem as placas dos computadores, fios de cobre/alumínio, cabos ocorreu de forma inadequada. Assim, ressaltaram que as OCMRR não são capacitadas para manusear os REEE, e que necessitam de gestão técnica na parte de capacitações para desmantelamento desses resíduos.

De acordo com De Oliveira *et al.* (2020), as OCMRR analisadas comercializam os REEE para atravessadores, que acabam estipulando os valores de comercialização. As OCMRR não têm esta capacidade de estipular esses valores de venda, e acabam acatando o que os atravessadores determinam. A falta de gestão atrapalha os catadores a ter parcerias com o governo, empresas, pois não tem credibilidade nelas, e acabam que vendem os REEE para atravessadores (CHITAKA *et al.*, 2022).

3.1.2 Falta de infraestrutura

Em países em desenvolvimento, as OCMRR geram emprego e renda às pessoas socialmente vulneráveis, no entanto, estas organizações sofrem com problemas operacionais, de infraestruturas, equipamentos, manuseio dos resíduos, baixo nível de profissionalização, dentre outros (GHISOLFI *et al.*, 2017; KASPER, 2022).

Ferreira *et al.* (2022) citam que uma das barreiras para as OCMRR no SLR de REEE é a falta de disponibilidade de estruturas para receber, triar e manusear os resíduos. As OCMRR têm dificuldade em adquirir ferramentas apropriadas para o manuseio dos REEE, por falta de recursos financeiros (CHITAKA *et al.*, 2022). Também tem dificuldades em ter o seu próprio espaço, que muitas vezes são locados pelo poder público, e/ou falta de espaços cobertos, adequados para o manuseio dos REEE (CHITAKA *et al.*, 2022).



A pesquisa realizada por Kasper (2022) mostra que com a falta de estrutura para receber e desmontar esses resíduos, os catadores acabam trabalhando de forma precária e com baixos salários. E ainda, para montar toda uma infraestrutura, bem como atender aos requisitos de segurança, precisam de altos investimentos, sendo que as OCMRR enfrentam dificuldades econômicas, não tendo como arcar.

Contudo, no Brasil falta um modelo econômico para a operacionalização do SLR de REEE que seja capaz de elevar o profissionalismo das OCMRR, pois a atuação dos catadores possibilita o aumento da eficiência ao longo do sistema, possibilitando a consolidação de volumes e o recebimento, segregação e acondicionamento desta tipologia de resíduos, favorecendo para as indústrias de reciclagem (GIESE *et al.*, 2021).

3.1.3 Resistência das empresas em integrarem os SLR de REEE

De acordo com Demajorovic *et al.* (2016), as indústrias recicladoras não estão preparadas para envolver as OCMRR no SLR de REEE, pois acabam postergando os investimentos com este sistema, considerando que as OCMRR e até mesmo as indústrias não possuem a infraestrutura adequada para a coleta, triagem, desmantelamento e reciclagem dos resíduos, tendo em vista que os gastos são onerosos.

Demajorovic *et al.* (2016) ainda citam que os atores envolvidos nos SLR no Brasil estão sentindo dificuldades em se fazer a gestão compartilhada, por ser algo novo, e não ter definição dos papéis de cada ator envolvido, sendo uma problemática a questão da divisão dos custos, em especial com o transporte, e com a responsabilidade.

As empresas também manifestaram resistência em integrarem os SLR de REEE, conforme citado por Ferreira *et al.* (2019), não aderiram a parceria com as OCMRR, devido a falta de infraestrutura e reconhecimento do trabalho que estas podem agregar. O não estabelecimento de parcerias entre as empresas grandes geradoras e as de reciclagem com as OCMRR são por falta de capacitação no processo de desmontagem; falta de licenças ambientais; não emitem notas fiscais, o que os prejudicam em se tornarem fornecedores para as indústrias; infraestrutura; logística; equipamentos; gestão (VALENTE *et al.*, 2021; DEMAJOROVIC *et al.*, 2016).

Ainda, um dos fatores que afetam também são as longas distâncias entre as OCMRR e as empresas de reciclagem (unidades industriais), em especial no Brasil, fazendo com que os catadores dependam dos atravessadores (VALENTE *et al.*, 2021). Dias *et al.* (2018), citam que no país há poucas indústrias recicladoras de REEE, e que 89% destas realiza apenas a desmontagem, e exportam para outros países.

3.1.4 Concorrência

O estudo de Ferreira *et al.* (2019), identificaram que as empresas não aderiram a parceria com as OCMRR por causa da concorrência, por prestarem os mesmos serviços de coletar, triar, desmanche, dentre outros. Porém, pelo fato de serem empresas, conseguem fechar negócio mais rápido que as OCMRR. E um outro fator é a ação dos catadores informais, que retiram os REEE antes da coleta municipal (FERREIRA *et al.*, 2019).

Kasper (2022) menciona que há diversas empresas sucateiras (atravessadores) que trabalham com gerenciamento de REEE, como coleta, transporte, triagem e



comercialização destes resíduos, e muitas vezes estes atravessadores acabam fazendo parcerias com as OCMRR, e assim facilitam a comercialização. Um outro ponto considerado pela autora, é que estes atravessadores não possuem licença ambiental e podem realizar o descarte inadequado desses resíduos.

3.1.5 Desvios dos REEE

Os REEE são descartados em fluxos vinculados à gestão municipal de resíduos sólidos, como na coleta seletiva comum, e/ou na coleta pública municipal, acabam em aterros sanitários, o que pode: desperdiçar materiais valiosos (metais preciosos, por exemplo), uma vez que estes materiais podem substituir matérias-primas valiosas, inserindo na mineração urbana; impactar o meio ambiente com a disposição e manejo inadequados desses resíduos, o que pode causar também problemas de saúde, com a falta de equipamentos de segurança, o manejo inadequado; e elevar os custos com a destinação, pois serão mais resíduos a serem encaminhados para aterro sanitário (SANTOS E OGUNSEITAN, 2022; XAVIER *et al.*, 2021).

No Brasil, o gerenciamento de resíduos sólidos urbanos não inclui a coleta de REEE, sendo que englobar esta tipologia de resíduos pode apresentar um retorno atrativo para as OCMRR, e diminuir custos da municipalidade, incluindo na coleta seletiva municipal (VALENTE *et al.*, 2021).

3.2 Disfunções Legais

As disfunções legais identificadas na revisão sistemática da literatura foram destacadas no tópico a seguir.

3.2.1 Dificuldade das OCMRR em atender os requisitos legais

O Decreto Federal nº10.240/2020 que estabelece a LR de REEE prevê a participação das OCMRR no SLR, desde que legalmente constituídas e habilitadas, através de um instrumento legal para prestação dos serviços via empresas ou entidades gestoras (BRASIL, 2020). Em seu artigo 37 (BRASIL, 2020), que diz:

“As cooperativas e as associações de catadores de materiais recicláveis poderão integrar o sistema de logística reversa de que trata este Decreto:

- I - Desde que sejam legalmente constituídas e habilitadas; e
- II - Por meio de instrumento legal firmado entre a cooperativa ou a associação e as empresas ou entidades gestoras, para prestação dos serviços, na forma da legislação.”

Ferreira *et al.* (2019) mencionou que uma das barreiras para as OCMRR atuarem com os REEE é que não estavam presentes nas discussões do acordo setorial, somente as empresas. Porém, o Decreto Federal inclui as OCMRR, mas com ações ainda incipientes. O cumprimento de todos os requisitos legais, incluindo também o licenciamento ambiental e as normas regulamentadoras de segurança e saúde do trabalho são desafios para as OCMRR (GHISOLF *et al.*, 2017; DEMAJORIOVIC *et al.*, 2016).



Entretanto, para as OCMRR se adequarem, manter a atividade legalizada, precisam de investimentos de custos, e atualmente, não possuem recursos financeiros para investir nos galpões, em documentação legal, licenças, capacitações, equipamentos (KASPER, 2022). O Decreto Federal nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022, reforça a inserção das OCMRR nos SLR, e estabelece políticas públicas destinadas aos catadores no qual deverão observar a possibilidade de dispensa de licitação; capacitação; fortalecimento institucional; formalização; empreendedorismo e a melhoria das condições de trabalho (BRASIL, 2022).

3.3 Disfunções Sociais

As disfunções sociais identificadas na revisão sistemática da literatura foram destacadas nos tópicos a seguir.

3.3.1 Falta de Capacitação

Uma das disfunções enfrentadas pelas OCMRR para a inserção no SLR de REEE, segundo os autores Ferreira *et al.* (2022) é a falta de preparo técnico para gerenciamento desses resíduos, principalmente quanto ao armazenamento e ao desmonte dos materiais.

De acordo com a pesquisa com catadores organizados realizada por Dias *et al.* (2020), é evidente a falta de percepção dos catadores em relação ao manuseio inadequado de REEE, que pode contaminar o solo, e conseqüentemente, causar danos à saúde, por exemplo, sendo que o adequado é dispor esses resíduos em locais livres de intempéries.

Contudo, a capacitação é o caminho para mitigar os riscos, no entanto os baixos índices de instrução dos catadores tornam esta atividade um desafio, sendo que algumas OCMRR do Brasil têm conduzido a prática de treinamentos para seus integrantes (DE OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Entretanto, a falta de conceito de cooperativismo, deficiências na classificação dos materiais na triagem, problemas de comunicação interna são conseqüências de falta de treinamento profissional e baixas taxas de escolaridade entre os associados e resultam na ineficiência do trabalho nas OCMRR e conseqüentemente no seu desempenho (ZON *et al.*, 2020).

Assim, o baixo nível de escolaridade dos trabalhadores e de suas famílias também é apontado como uma das causas da baixa renda desta categoria, e a falta de orientação técnica e benefícios básicos de trabalho (ZON *et al.*, 2020).

3.3.2 Dificuldade de regulamentar as OCMRR

Uma das barreiras que países em desenvolvimento vem enfrentando, em especial o Brasil, é a inclusão social das OCMRR, sendo que a PNRS determina a inserção destas em especial no SLR de REEE, porém, muitas são vistas como excluídas, mas que precisam estarem ativas para atuar e prestar serviços junto às empresas e indústrias (DIAS *et al.*, 2020).

As OCMRR têm dificuldade em se regulamentar sendo um dos fatores a ausência de documentações necessárias, em especial dos catadores, e isto dificulta a formalização de parcerias com poder público, e até mesmo com as empresas, e também na prestação de quando contratadas (DIAS *et al.*, 2020).



No entanto, a formalização das OCMRR não garantem que terão condições dignas de trabalho e geração de renda para estes catadores (DIAS *et al.*, 2020). No entanto, Kasper (2022) cita que a regulamentação das OCMRR é um modelo de reconhecimento da profissão, e uma forma de obter os direitos de trabalho.

Porém, Castro *et al.* (2023) mencionam que a falta de formalização dos catadores não associa estes em benefícios sociais, integração com indústrias, que acabam competindo com o mercado informal, bem como capacitação para manusear resíduos perigosos, como os REEE.

3.3.3 Insuficiência de conscientização da população em relação ao descarte

Demajorovic *et al.* (2016) identificaram que os REEE são descartados erroneamente por causa do desconhecimento por parte da população, dos consumidores. Os autores citam ainda, que em países desenvolvidos, a porcentagem de descarte adequado é alta, considerando o elevado nível de conscientização da população.

De acordo com Dias *et al.* (2020), o descarte correto pelos usuários só será possível com campanhas de conscientização, implementar um projeto de educação ambiental nos municípios para a população, em relação ao perigo de se descartar em locais indevidos os REEE, os malefícios que podem causar.

3.3.4 Falta de reconhecimento, de inclusão social, conforme a PNRS

Os catadores de materiais recicláveis estão em destaque na PNRS, já que a lei promove a integração desses trabalhadores nas ações de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (GIESE *et al.*, 2021), e contribuem para o SLR e a implementação da economia circular. De acordo com Ferreira *et al.* (2019), a maioria dos catadores organizados desconhecem da PNRS, o que os prejudicam, pois não reconhecem seus direitos. Segundo os autores Kasper (2022) e Castro *et al.* (2023), e o trabalho dos catadores, especialmente em países em desenvolvimento, é caracterizado por: trabalho intensivo em mão de obra; não possuem vínculo empregatício; salários baixos; falta uniformes, equipamentos de proteção individual (EPI), tecnologias essenciais para o beneficiamento dos resíduos; uso de trabalho manual com ferramentas inadequadas; processos de reciclagem brutos (queima, derretimento de fio, desmontagem física); exposição a compostos perigosos.

Zon *et al.* (2020) e Yamane *et al.* (2022) destacam outro agravante, como problemas relacionados às condições de trabalho insalubres com que algumas OCMRR, mesmo formalizadas, estão expostas. Os autores corroboram com a necessidade de capacitação para não só ampliarem as oportunidades de negócios, como também lidarem melhor com a insalubridade e segurança do trabalho.

3.4 Disfunções Ambientais

A presença de metais pesados caracterizam os REEE como perigosos à saúde humana e ao meio ambiente, e o manuseio desses resíduos sem equipamentos de segurança podem expor os catadores ao contato com essas substâncias que oferecem riscos (CHITAKA *et al.*, 2022).

De acordo com Santos e Ogunseitan (2022), os catadores utilizam práticas rudimentares para dismantelar os REEE, práticas estas como queima a céu aberto,



utilização de ferramentas precárias, armazenamento em local sem cobertura, sem proteção de intempéries, devido ao alto valor agregado aos metais valiosos presentes nesses resíduos, colocando em risco a saúde e impactando o meio ambiente.

Os impactos negativos decorrentes da disposição inadequada de REEE estão relacionados com o potencial tóxico, que podem provocar danos ao meio ambiente e à saúde em especial dos catadores, e são considerados como resíduos perigosos, causando preocupação especialmente em países em desenvolvimento (Hoang *et al.* (2023)).

Hoang *et al.* (2023) realizaram uma pesquisa sobre os poluentes presentes nos REEE, e o impacto negativo que provoca à saúde e ao meio ambiente daqueles que trabalham manuseando esses resíduos, e foi detectado que há prática de queima a céu aberto de desmantelamento sem EPI's, para retirar os metais valiosos, que são vendidos para atravessadores. Estes autores também citaram que é difícil saber se os metais presentes nesses resíduos emitem poluentes perigosos em seus processamentos, sobre a possível contaminação por REEE, mas que há concentrações de metais pesados em ambientes, como o solo, água, ar, onde há desmantelamento de forma inadequada, e sem EPI, sendo que as principais fontes de emissão desses poluentes foram as placas de circuito impresso, fios e cabos.

Todavia, estes catadores desconhecem que estas atividades são inadequadas, e que no REEE contém metais pesados, tóxicos, que podem ocasionar problemas tanto para a sua saúde, quanto ao meio ambiente (CHITAKA *et al.*, 2022).

De acordo com Chitaka *et al.* (2022), encontraram catadores que lidam com REEE, e que possuem problemas de saúde, como distúrbios e deficiências nos músculos, e problemas neurológicos, e também expostos aos compostos químicos perigosos, como metais pesados, arsênico, que causam efeitos nocivos à saúde humana.

4. Considerações Finais

Este artigo mostrou que ainda há muitas disfunções econômicas, legais, sociais e ambientais a serem sanadas para colocar em prática o que foi ensejado pela PNRS e pelo Decreto Federal nº 10.240/2020, que impedem as OCMRR de serem inseridas no SLR de REEE.

As disfunções foram discutidas no texto, com destaque para: a falta de infraestrutura das OCMRR, que não possuem recursos para investimentos em equipamentos, maquinários e melhorias no galpão para que os catadores tenham melhores condições em receber, triar e manusear os REEE; a falta de conhecimento técnico por parte dos catadores para uma melhor operacionalização do sistema; desconhecimento da população em relação ao descarte adequado dos REEE. Outro fator é a falta de capacitação dos catadores tanto para manusear esses resíduos, quanto para gestão, falta de preparo técnico para gerenciamento dos REEE, sendo que dificulta parcerias com as empresas e até mesmo poder público, que acabam não acreditando no trabalho e potencial das OCMRR. Além disso, as OCMRR têm dificuldade em atender aos requisitos legais para se regularizar.

No entanto, é possível transformar as OCMRR em um agente do SLR de REEE, proporcionando geração de emprego e renda; diminuição dos riscos à saúde e meio ambiente; fortalecimento das indústrias de reciclagem; capacitação técnica; reconhecimento da PNRS e do referido decreto federal, dentre outras citadas nesta



pesquisa. E que a responsabilidade dessa gestão seja compartilhada de fato, sendo que os REEE são considerados como parte de uma atividade econômica, o que compromete também a gestão integrada de resíduos sólidos.

Desse modo, os resultados mostram que necessitam de mais discussões sobre as disfunções que impactam a inserção das OCMRR no SLR de REEE, uma vez que as citadas nesta pesquisa estão presentes no cotidiano destas OCMRR, deixando como lacuna e sugestão de pesquisa a identificação de quais delas impactam mais, bem como um estudo sobre o setor informal (catadores e atravessadores de resíduos).

Referências

ALI, a. S.; AKALU, Z. K. 2022. E-waste Awareness and Management Among People Engaged in E-waste Selling, Collecting, Dismantling, Repairing, and Storing Activities in Addis Ababa, Ethiopia. **Environmental Health Insights**. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/11786302221119145>>. Acesso em: 20 jun. 2023.

BRASIL. Lei nº 12.305, 02 ago. 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. **Brasília**, 2010.

BRASIL. Decreto nº 10.240, 12 fev. 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. **Brasília**, 2020.

BRASIL. Decreto nº 10.936, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a política nacional de resíduos sólidos. **Brasília**, 2022.

CASTRO, F. D.; XAVIER, B. G.; CUTAIA, L. et al. Chapter 15 - The role of the informal sector on e-waste management: a case study from Brazil. **Waste Management and Resource Recycling in the Developing World**, Elsevier, 2023, p. 327-361.

CHITAKA, T. Y.; MOYO, T.; GIHRING, K.; SCHENCK, C. The myth of livelihoods through urban mining: The case of e-waste pickers in Cape Town. **South African Journal of Science**. 2022; 118. Disponível em: <<https://doi.org/10.17159/sajs.2022/12456>>. Acesso em: 05 jul. 2023.

DEMAJOROVIC, J. AUGUSTO, E. E. F. SOUZA, M. T. S. Logística reversa de REEE em países em desenvolvimento: desafios e perspectivas para o modelo brasileiro. **Ambiente & Sociedade**. São Paulo. Vol. XIX, n. 2. pag. 119-138, 2016. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/asoc/a/hsym9V35CCXBNfn4sbNmctD/?lang=pt>>. Acesso em: 15 jun. 2023.

DIAS, P.; MACHADO, A.; HUD A, N.; BERNARDES, A.N., 2018. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: a study on the Brazilian recycling routes.



Journal of Cleaner Production, v.174, p. 7-16. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652617325295>>. Acesso em: 29 jun. 2023.

DIAS, P.; PALOMERO, J.; CENCI, M.P. *et al.* Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic. **Cleaner Waste System**, v3, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772912522000227>>. Acesso em: 02 jul. 2023.

FERREIRA, V. F. M.; GONÇALVES DIAS, S. L. F.; VALLIN, I. C. Inclusion of waste pickers in the reverse logistics of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) – the case study of Projeto Eco Eletro. 2019. **Biblioteca digital de periódicos da Universidade Federal do Paraná**. Volume 51, 2019. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/made/article/view/59970/39383>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

FERREIRA, J. G.; FIGUEIREDO, F. F.; SILVEIRA, R. M. C. Socioeconomia do meio ambiente e política ambiental. 1ª ed. **Rio de Janeiro**: Letra Capital, 2022. Disponível em: <https://cchla.ufrn.br/dpp/wp-content/uploads/2022/02/9786589925637_Socioeconomia-do-Meio-ambiente.pdf>. Acesso em: 06 jul. 2023.

FORTI, V; BALDE, C. P; KUEHR, R.; BEL, G. The global e-waste monitor 2020: quantities, flows and the circular economy potential. 2020. Disponível em: <https://collections.unu.edu/eserv/UNU:7737/GEM_2020_def_july1.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2023.

GHISOLFI, V.; CHAVES, G. DE L. D.; SIMAN, R. R.; XAVIER, L. H. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: a perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste Management**, 60 (2017), pp. 14-31. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16307589>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

GIESE, E. C.; XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; ARAUJO, R. A. (org.). Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos. **Rio de Janeiro**: CETEM/MCTI, 2021. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2375>>. Acesso em: 15 jul. 2023.

HOANG, A. Q.; TUE, N. M.; TU, M. B. *et al.* A review on management practices, environmental impacts, and human exposure risks related to electrical and electronic waste in Vietnam: findings from case studies in informal e-waste recycling áreas. **Environmental Geochemistry and Health**, 45, 2705-2728, 2023. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-022-01408-4>>. Acesso em: 10 jul. 2023.



KASPER, G. P. Entre catadores e especialistas: disputas em torno da reciclagem de eletrônicos em Florianópolis – SC. **Dissertação (mestrado)** – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em sociologia e ciência política, Florianópolis, 2022.

SANTO, S. M.; OGUNSEITAN, O. A. E-waste management in Brazil: Challenges and opportunities of a reverse logistics model. **Environmental Technology & Innovation**, 28, 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186422002085>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

SHITTU, O. S.; WILLIAMS, I. D.; SHAW, P. J. 2021. Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. **Waste Management**, 120, 2021, p. 549–563. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.10.016>>. Acesso em: 04 jul. 2023.

SIMAN, R.R.; YAMANE, L.H.; BALDAM, R.L. *et al.* Governance tools: Improving the circular economy through the promotion of the economic sustainability of waste picker organizations. **Waste Management (Elmsford)**, 105, 148-169. 2020. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X20300489>>. Acesso em: 01 jul. 2023.

VALENTE, B. V.; GUADIROBA, R. C. S.; CONEJERO, M. A. *et al.* 2021. Economic analysis of waste electrical and electronic equipment management: a study involving recycling cooperatives in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, 2021. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s10668-021-01403-2>>. Acesso em: 10 jul. 2023.

XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; LEPAWSKY, J., 2021. Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks. **Journal of Cleaner Production**, 2021, v. 297. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652621007903>>. Acesso em: 01 jul. 2023.

YAMANE, L.; SIMAN, R. R.; DUTRA, R. M. S. Assessment and perception of occupational risks in waste picker organizations: a portrait of waste pickers situation after formal integration. 2023. **Detritus Multidisciplinary Journal for Waste Resources & Residues**. Volume 22 – 2023, p. 13-26. Disponível em: <<https://lagesa.ufes.br/pt-br/publicacoes-cientificas>>. Acesso em: 28 jun. 2023.

ZON, J. L. N.; LEOPOLDINO, C. J.; YAMANE, L. H.; SIMAN, R. R. Waste pickers organizations and municipal selective waste collection: Sustainability indicators. 2020. **Waste Management**, 2020, v. 118, p. 219-231. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X20304657>>. Acesso em: 28 jun. 2023.



OS GARGALOS DA CADEIA DE REVALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL

Raphael Salviano^{1*}; Patrícia Guarnieri¹

¹ Programa de Pós-graduação em Administração da Universidade de Brasília –
PPGA/UnB

*raphael.salviano@outlook.com

Resumo

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos atualmente figuram como um dos fluxos de resíduos sólidos urbanos em mais rápido crescimento no Brasil. Segundo a Green Eletron (2021), somente 3% dos REEE produzidos no país são reintroduzidos nas cadeias de valor formal. Diante disso, o presente artigo tem como objetivo identificar os gargalos existentes da cadeia de revalorização de REEE brasileira na visão de diferentes *stakeholders*. Para tanto, realizou-se pesquisa indutiva, aplicada, exploratório-descritiva e de abordagem qualitativa, cujos dados foram coletados por meio de entrevistas semiestruturadas com *stakeholders* do SLR para este tipo de resíduo no Brasil (n = 12). Os resultados apontaram para a existência de gargalos relacionados à logística, à regulamentação do setor, ao consumidor, ao mercado e ao design dos EEE. A pesquisa contribui para a análise e a tomada de decisões referentes ao endereçamento de soluções para o aprimoramento da cadeia tanto por *players* do setor privado, quanto por formuladores de políticas públicas.

Palavras-chave: REEE; lixo eletrônico; gargalos; reciclagem; revalorização; Brasil.

1. Introdução

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos – REEE ou, simplesmente, lixo eletrônico (na língua inglesa *waste from electrical and electronic equipment* – WEEE ou *e-waste*) atualmente figuram como um dos fluxos de resíduos sólidos urbanos em mais rápido crescimento no Brasil e no mundo e que se tornaram um problema tanto para países desenvolvidos, quanto para países em desenvolvimento (NOWAKOWSKI; MRÓWCZYŃSKA, 2018; OTTONI; DIAS; XAVIER, 2020).

Em 2019, o volume de REEE produzido em todo o planeta somou 53,6Mt, equivalente a uma média de 7,3kg *per capita*. Esse montante representa um aumento de 15% em relação a 2014 e que, segundo as projeções, deverá dobrar até 2030. Em números absolutos, o continente americano é o segundo maior produtor de REEE do mundo (atrás apenas da Ásia) com uma geração de 13,1Mt em 2020. Destes, apenas 9,4% tiveram sua destinação documentada, isto é, formalmente coletada e submetida a procedimentos de reciclagem. O Brasil é responsável por uma fatia equivalente a 16,36% de todo o lixo derivado de equipamentos eletroeletrônicos do continente, o que



o posiciona como o segundo maior produtor de REEE das Américas, com uma média *per capita* equivalente a 10,2kg (FORTI *et al.*, 2020).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS, instituída por efeito da Lei nº 12.305/2010, estabelece um conjunto de objetivos, princípios e instrumentos para a gestão integrada e o gerenciamento dos resíduos sólidos, incluídos os REEE (BRASIL, 2010). Na prática, conforme previsto na PNRS, essas inovações devem ser implementadas com a assinatura dos acordos setoriais, configurados como atos de natureza contratual firmados entre os atores envolvidos na cadeia de suprimentos para a instituição da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto (BRASIL, 2010). O acordo setorial para implantação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes foi estabelecido em 2019, embora a legislação determinasse a obrigatoriedade do estabelecimento desse instrumento desde sua instituição, e representou um passo relevante para a institucionalização de medidas adequadas para a destinação e o tratamento de REEE provenientes de equipamentos colocados no mercado interno.

Segundo a Green Eletron (2021), somente 3% dos REEE produzidos no país são reintroduzidos nas cadeias de valor formal e, quando isto ocorre, materiais de alto valor provenientes de placas de produtos eletroeletrônicos são exportados para reciclagem industrial, enquanto à indústria nacional são destinados apenas os materiais de menor valor presentes na composição dos equipamentos, como plásticos e vidro (EMF, 2017).

Neste sentido, o presente artigo tem como objetivo identificar os gargalos existentes da cadeia de revalorização de REEE brasileira na visão de diferentes *stakeholders*. Seus resultados contribuem, do ponto de vista prático, para a proposição de estratégias para aprimorar essa cadeia, favorecendo a transição para um sistema de produção e consumo circular.

2. Referencial teórico

A conceituação dos equipamentos eletroeletrônicos – EEE está, em certo nível, condicionada ao contexto político-geográfico de análise, visto que mantém estreita relação com as disposições técnicas e normativas do ambiente institucional para a gestão da cadeia de suprimentos. No Brasil, a definição constante no texto do acordo setorial para EEE os compreende como dispositivos de uso doméstico que dependem de correntes elétricas com tensão nominal não superior a 240V para seu adequado funcionamento (BRASIL, 2019). Embora o acordo setorial brasileiro para EEE não apresente uma classificação para os equipamentos, tal como na diretiva europeia, um de seus anexos relaciona uma lista não exaustiva de mais de 200 produtos identificados com código da Nomenclatura Comum do Mercosul – NCM comercializados no mercado brasileiro.

A produção e o uso desses equipamentos exigem o consumo de uma quantidade significativa de recursos diversos, como cobre, ouro e prata, além de materiais críticos como tungstênio, nióbio e cobalto (OTTONI; DIAS; XAVIER, 2020; BRITO *et al.*, 2022). De maneira indistinta, os metais ferrosos, isto é, aqueles preciosos e de terras raras, representam quase a metade do peso dos EEE, enquanto a outra metade é representada por outros materiais, como plástico e vidro. Entretanto, por se tratarem de equipamentos diversos, cada categoria de EEE tem suas particularidades e, por isso,



justifica-se a necessidade de uma classificação adequada para fins da gestão da cadeia de suprimentos, incluindo dos resíduos gerados ao final da vida útil desses equipamentos, de sua fabricação, venda ou consumo, chamados de REEE ou lixo eletrônico (UNIÃO EUROPEIA, 2003; ABINEE, 2017; ABRELPE, 2021).

O ambiente político-legal brasileiro, no que diz respeito à gestão de resíduos e à reciclagem, encontra-se em um momento de implementação de *frameworks* regulatórios relevantes, definidos por força da Lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (REBEHY *et al.*, 2019). A PNRS, cuja tramitação prolongou-se por cerca de 20 anos no Congresso Nacional, define um conjunto de princípios, objetivos e instrumentos que devem ser adotados para a gestão de resíduos sólidos ambientalmente adequada e integrada pelos entes federativos (GUARNIERI; CERQUEIRA-STREIT; BATISTA, 2020; BRITO *et al.*, 2022). Rebehy *et al.* (2019) argumentam que, embora as discussões sobre questões ambientais e gestão de resíduos no Brasil tenham se iniciado consideravelmente posteriores aos países desenvolvidos, os princípios preconizados pela PNRS brasileira são consistentes e alinhados àqueles observados nos países desenvolvidos.

A PNRS em si não especifica metas quantitativas e prazos para a implementação de seus princípios (XAVIER; OTTONI; LEPAWSKY, 2021). Esses aspectos devem ser estabelecidos por meio dos acordos setoriais, definidos como “atos de natureza contratual firmados entre o poder público e fabricantes, importadores distribuidores ou comerciantes, tendo em vista a implantação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto” (BRASIL, 2010, art. 3º).

O acordo setorial para a implementação de sistemas de logística reversa – SLR para produtos elétricos e eletrônicos de uso doméstico e pessoal e seus componentes foi firmado em 2019 entre o poder público e entidades do setor privado e regulamentado em nível federal, posteriormente, por efeito do Decreto nº 10.240/2020 (BRASIL, 2019, 2020; XAVIER; OTTONI; LEPAWSKY, 2021). Sinteticamente, esse SLR é composto pelas seguintes principais etapas (MMA, 2022):

1. Descarte dos equipamentos eletroeletrônicos sem uso em pontos de entrega voluntária – PEV pelo consumidor;
2. Recebimento e armazenamento adequado dos equipamentos descartados nos PEV ou em pontos de consolidação temporariamente, para posterior destinação final ambientalmente adequada;
3. Transporte dos equipamentos eletroeletrônicos descartados dos PEV até os pontos de consolidação ou diretamente até a destinação final ambientalmente adequada;
4. Transporte dos equipamentos eletroeletrônicos descartados dos pontos de consolidação até a destinação final ambientalmente adequada; e
5. Destinação final ambientalmente adequada dos equipamentos eletroeletrônicos descartados por meio de reutilização, reciclagem, recuperação e/ou disposição final ambientalmente adequada.

Vale ressaltar que a realidade brasileira enfrenta uma série de desafios à implementação do acordo setorial, dentre os quais estão a ausência de SLR para REEE adequados na maior parte das cidades do país (OTTONI; DIAS; XAVIER, 2020). Rebehy *et al.* (2019) destacam que, do ponto de vista da indústria, os principais desafios



são: i) a concentração de empresas de reciclagem nas regiões sul e sudeste do Brasil, que aumentam os custos de transporte dos resíduos provenientes de outras regiões do país; ii) os altos custos operacionais relacionados à logística, à recuperação e à venda dos materiais; iii) o baixo valor agregado dos itens recuperados comparado aos altos custos da operação; iv) a grande dispersão geográfica dos resíduos; e, v) o incipiente apoio governamental para a coleta seletiva.

Do ponto de vista do governo, os principais desafios são: i) a baixa capacidade institucional dos municípios; ii) as baixas taxas de sustentabilidade financeira; iii) a baixa capacidade de auditoria das entidades públicas; iv) a falta de incentivos fiscais e de crédito para a logística reversa e para a reciclagem; v) a baixa adesão de todos os *stakeholders* do setor privado ao acordo setorial; e, vi) a falta de comunicação com os cidadãos sobre os custos da gestão dos resíduos e da importância de sua atuação ativa (REBEHY *et al.*, 2019).

Sob esta perspectiva, outros dois marcos regulatórios nacionais vêm contribuir com o endereçamento dos desafios existentes no contexto brasileiro: i) o Decreto nº 11.043/2022, que aprovou o Plano Nacional de Resíduos Sólidos; e, ii) a Lei nº 14.260/2021, que estabelece incentivos à indústria da reciclagem e cria os Fundos de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecycle) e de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecycle).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos aborda diferentes SLR, incluindo o de eletroeletrônicos, com a finalidade de diagnosticar a sua situação atual; viabilizar a gestão de resíduos sólidos por meio do desenvolvimento de planos de gestão nas diferentes esferas de governo; e, estruturar de um sistema de informações que permita o acompanhamento, o monitoramento e a avaliação da implementação da PNRS (MMA, 2022). A Lei nº 14.260/2021, por sua vez, embora não tenha relação direta com o acordo setorial vai ao encontro do art. 44 da PNRS, que dispõe sobre a instituição de normas para a concessão de incentivos fiscais, financeiros ou creditícios a indústrias do setor de reciclagem, projetos relacionados à responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos, e empresas atuantes no serviço de limpeza urbana (BRASIL, 2010, 2021).

3. Métodos e técnicas de pesquisa

A pesquisa realizada classifica-se como **indutiva**, uma vez que parte de dados particulares, suficientemente constatados, e visa inferir uma verdade geral não contida nas partes examinadas (Marconi & Lakatos, 2003); **aplicada**, na medida em que “objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos” (Silva & Menezes, 2005, p. 20); **exploratória**, uma vez que intenta ampliar a compreensão do problema, tornando-o mais explícito e possibilitando a formulação de hipóteses, e **descritiva**, uma vez que preocupa-se em descrever as características do fenômeno para a identificação de relações entre variáveis (SILVA; MENEZES, 2005); e, por fim, **qualitativa** visto que explora e compreende o significado que indivíduos ou grupos atribuem a problemas sociais ou humanos subjetivamente (CRESWELL; CRESWELL, 2018).



Os dados afins à consecução do objetivo da pesquisa foram coletados por meio de **entrevistas**, que se configuram como um procedimento técnico essencialmente qualitativo no qual o pesquisador apresenta-se a um indivíduo e lhe formula perguntas de maneira metódica, sob a forma de um diálogo assimétrico, a fim de obter dados caros à investigação científica (MARCONI; LAKATOS, 2003; GIL, 2008). A entrevista é uma técnica amplamente utilizada na pesquisa social para o levantamento de informações sobre “o que as pessoas sabem; creem; esperam; sentem ou desejam; pretendem fazer, fazem ou fizeram; bem como acerca das suas explicações ou razões a respeito das coisas precedentes” (GIL, 2008, p. 128).

Marconi e Lakatos (2003) destacam que a entrevista pode ser: i) padronizada ou estruturada, na qual o entrevistador segue um roteiro ou formulário previamente planejado rigidamente; ii) despadronizada ou não-estruturada, na qual o entrevistador é dotado de liberdade para realizar as perguntas que julgar adequadas – normalmente abertas e respondidas dentro de uma conversa informal; e, iii) painel, na qual o entrevistador realiza um conjunto de perguntas padronizadas em intervalos temporais curtos para verificar a evolução de opiniões. Flick (2013) acrescenta a entrevista semiestruturada como uma variedade da técnica, na qual o entrevistador prepara um rol de perguntas para atender ao objetivo pretendido para a entrevista, mas não se restringe a elas. Para esta pesquisa, optou-se pela realização de entrevistas do tipo **semiestruturadas** a partir de roteiro previamente planejado pelo pesquisador.

O roteiro de entrevista semiestruturada foi submetido à **validação por juízes** previamente à realização da coleta de dados. Este procedimento tem como finalidade submeter o instrumento qualitativo de pesquisa à avaliação semântica por técnicos especialistas para observação de critérios como clareza de linguagem, pertinência prática e relevância teórica (GRECO *et al.*, 2015), além da organização, clareza, objetividade, fluidez de leitura e entendimento do conteúdo (HERMIDA; ARAÚJO, 2006). A escolha dos juízes foi feita com base no conhecimento e experiência nas bases conceituais do estudo, avaliada com base na quantidade e qualidade das publicações em periódicos científicos nacionais e estrangeiros verificada na Plataforma Lattes em janeiro de 2023.

A amostra da pesquisa foi composta por meio da técnica *snowball*, caracterizada como uma amostra não-probabilística formada solicitando-se a um grupo de indivíduos de uma população para apontarem outros indivíduos repetidamente até a saturação (Thompson, 2012). Inicialmente, realizou-se um levantamento de representantes de organizações de interesse ($n = 8$), isto é, *stakeholders* do SLR para EEE brasileiro firmado a partir da assinatura do acordo setorial, tal como sugerem Souza *et al.* (2015). Esses representantes foram contatados por meio de telefone, e-mail e/ou perfil no LinkedIn para convite à participação na entrevista semiestruturada.

Valendo-se da amostragem *snowball*, foram indicados à participação na pesquisa um total de 29 indivíduos, cujos dados para contato foram compartilhados pelos próprios participantes que os indicaram. Destes, foram contatados 17 indivíduos com base na relevância do *stakeholder* indicado e na frequência de indicação, visto que alguns *stakeholders* foram indicados mais de uma vez. Ao final, foram realizadas 12 entrevistas (~71% do total de *stakeholders* indicados), quantidade na qual foi atingida a saturação teórica ou saturação de dados que, de acordo com Bowen (2008), ocorre por



meio da inclusão de participantes no estudo continuamente até que o conjunto de dados esteja completo, isto é, haja replicação ou redundância dos dados e que nada novo seja adicionado.

As entrevistas foram realizadas a distância, em formato virtual, o que possibilitou um maior alcance de *stakeholders*, visto que as organizações estão sediadas em diferentes Unidades da Federação – UF. Para tanto, utilizou-se a Plataforma Microsoft Teams®, uma vez que permite a gravação e a transcrição das falas em tempo real para posterior categorização e análise. As transcrições das entrevistas foram tabuladas em planilha eletrônica, com apoio do *software* Microsoft Excel®, para possibilitar a análise dos dados.

4. Resultados

Para a compreensão dos gargalos existentes na cadeia de revalorização de REEE brasileira, questionou-se aos participantes da pesquisa “*Na sua visão, quem são os principais atores envolvidos na cadeia de revalorização de REEE no Brasil?*”. As respostas referiram-se a nove diferentes atores: i) catadores (organizados em cooperativas ou não); ii) consumidores; iii) distribuidores; iv) entidade gestora; v) fabricantes; vi) importadores; vii) operadores de manufatura reversa; viii) recicladoras; e, ix) varejistas. Dentre estes, os fabricantes e as recicladoras foram os atores mais citados (n = 5), enquanto a entidade gestora e os importadores foram os menos citados (n = 2).

Durante as entrevistas foi destacado que a atuação desses atores é interdependente e complementar, e que todos possuem igual importância de tal forma que a performance subótima de um deles impacta toda a cadeia.

A atuação dos **fabricantes** tem papel central na cadeia, uma vez que sob eles recai a pressão pela oferta dos equipamentos que, ao final da vida útil, geram resíduos. Ademais, são esses atores quem demandam matérias-primas, concebem os projetos de produto e estabelecem processos produtivos que impactam as formas e níveis de desempenho da atuação dos demais elos da cadeia.

A atuação dos **importadores** consiste na injeção de EEE no mercado nacional, contudo foi destacado que esses atores não são controlados, fiscalizados e responsabilizados da mesma forma que os demais e, como consequência, gera-se uma concorrência desleal com fabricantes, distribuidores e varejistas que possuem custos associados ao cumprimento das responsabilidades estabelecidas pelo acordo setorial, regulamentado posteriormente pelo Decreto nº 10.240/2020.

A atuação dos **distribuidores** e **varejistas** reside no escoamento dos EEE para o mercado. Por estarem mais próximos dos usuários dos equipamentos, alguns entrevistados ponderaram a estes atores uma responsabilidade maior pela comunicação e pela mobilização dos consumidores em prol da conscientização pelo descarte adequado dos bens após o consumo.

A atuação dos **consumidores** foi destacada pela responsabilidade do descarte adequado, a fim de viabilizar a operação dos demais elos da cadeia, e pela decisão do consumo. Cabe destacar que o termo “consumidor” foi utilizado em referência ao



usuário dos EEE e, por esta razão, compreende pessoas físicas, empresas e entidades estatais.

A atuação dos **catadores** (organizados em cooperativas ou não) reside na coleta dos REEE para encaminhamento ao tratamento adequado.

A atuação dos **operadores de manufatura reversa** foi distinguida da atuação das **recicladoras**. Enquanto os primeiros concentram-se na desmontagem e separação dos materiais, as últimas foram caracterizadas como os atores cujo papel está relacionado à transformação dos componentes contidos nos equipamentos, que são extraídos, tratados e reinseridos nas cadeias produtivas como matérias-primas secundárias, que mitigam a necessidade de extração de matéria-prima virgem do meio ambiente. Contudo, vale destacar que atuação desses atores não é mutuamente excludente, isto é, existem organizações que desempenham ambos os papéis.

E, por fim, a atuação da **entidade gestora** refere-se à implementação do SLR por meio da conexão dos elos da cadeia. No modelo brasileiro, as empresas, conforme o texto do Decreto nº 10.240/2020, financiam os sistemas repassando recursos a essas organizações, que têm como atribuições a homologação dos operadores e das recicladoras, a implantação de PEVs e realização de campanhas de educação dos usuários finais.

Quando questionados sobre a existência de desafios existentes nesta cadeia (“*Na sua visão existem obstáculos/desafios na cadeia de revalorização de REEE brasileira? Se sim, quais são eles?*”), os participantes foram unânimes em responder afirmativamente, mas divergiram no apontamento dos obstáculos e desafios. Na enumeração dos obstáculos e desafios existentes na cadeia de revalorização, identificou-se cinco tipos diferentes de gargalos relacionados i) à logística; ii) à regulamentação do setor; iii) ao consumidor; iv) ao mercado; e, v) ao design dos EEE, conforme detalhado no quadro a seguir.

Tipo	Principais gargalos citados pelos entrevistados
Relacionados à logística	<ul style="list-style-type: none">• Custo de transporte alto em função das distâncias geográficas.
Relacionados à regulamentação do setor	<ul style="list-style-type: none">• Falta de incentivos econômicos governamentais;• Falta de fiscalização do cumprimento legal;• Falta de responsabilização dos importadores; e• Tributação cumulativa (ou bitributação).
Relacionados ao consumidor	<ul style="list-style-type: none">• Falta de consciência;• Falta de conhecimento;• Visão negativa sobre produtos remanufaturados/reciclados; e• Retenção (ou não descarte).
Relacionados ao mercado	<ul style="list-style-type: none">• Concorrência desleal com <i>players</i> informais;• Falta de oferta de estímulos ao consumidor;• Falta de comunicação com consumidor;• Distribuição geográfica dos <i>players</i> centralizada nas regiões sul e sudeste; e• Desincentivo à cultura de reparo.



Tipo	Principais gargalos citados pelos entrevistados
Relacionados ao <i>design</i> dos EEE	<ul style="list-style-type: none">• Falta de peças universais;• Falta de identificação e classificação de materiais;• Uso de materiais diversos;• Uso de mistura de materiais; e• Uso de cola e juntas que dificultam a desmontagem.

Quadro 1 – Principais gargalos da cadeia de revalorização de REEE brasileira citados pelos entrevistados
Fonte: Os autores (2023).

Na visão dos participantes da pesquisa, os gargalos relacionados à **logística** dizem respeito às dimensões geográficas do Brasil, que tornam os custos de transporte uma barreira potencial ao fluxo de bens e materiais do local de coleta até o local de desmontagem, separação e tratamento.

Os gargalos relacionados à **regulamentação do setor** dizem respeito à falta de incentivos econômicos governamentais, à falta de fiscalização do cumprimento legal, à responsabilização dos importadores e à tributação cumulativa.

Os incentivos econômicos governamentais foram citados pelos entrevistados em referência ao desenvolvimento de projetos de reciclagem; de tecnologia nacional para o refino de materiais preciosos; de projetos de produto que incorporem princípios de economia circular de forma sustentável; e, de indústrias de manufatura reversa locais. Os entrevistados reconheceram que a adequação dos processos produtivos de design e fabricação dos EEE, bem como os procedimentos de tratamento pós vida útil têm um custo que, em última instância, é repassado ao consumidor, tornando estes produtos mais caros do que aqueles que não adotam os mesmos princípios, potencialmente inviabilizando a operação. Por esta razão, os incentivos econômicos citados visam desonerar os players da cadeia de revalorização de REEE. Os mecanismos específicos de incentivo citados pelos participantes da pesquisa serão discutidos adiante nesta dissertação.

A fiscalização foi apontada como um ponto fraco do ambiente regulatório atualmente, uma vez que não há cobranças e eventuais punições a todos os players atuantes no mercado da mesma forma.

Os importadores são responsáveis pela injeção de uma grande quantidade de EEE no mercado. Contudo, não há uma cobrança efetiva quanto a coleta desses produtos tal como aquela realizada aos fabricantes que atuam no mercado nacional.

A tributação cumulativa refere-se à característica do regime tributário vigente que tributa todas as fases da cadeia de igual modo à extração da matéria-prima virgem no ciclo logístico direto, ocasionando a chamada “bitributação”. Dessa forma, onera-se desproporcionalmente a cadeia de revalorização dos resíduos.

Os gargalos relacionados ao **consumidor** compreendem a falta de consciência referente ao consumo e ao descarte dos resíduos; a falta de conhecimento sobre os procedimentos de destinação adequados; a visão negativa sobre produtos remanufaturados e reciclados ou que contenham material reciclado; e a retenção domiciliar de EEE e/ou de seus resíduos.



Os gargalos relacionados ao **mercado** compreendem a concorrência desleal com players informais, a falta de oferta de estímulos ao consumidor, a falta de comunicação com consumidor, a distribuição geográfica dos players centralizada nas regiões sul e sudeste e o desincentivo à cultura de reparo.

A concorrência desleal com players informais ocorre pela existência de indivíduos (organizados em grupos ou não) que atuam de forma paralela à cadeia formal. Por atuarem na informalidade, esses players não passam por processos de licenciamento ambiental e não são tributados, o que lhes confere isenção de custos que oneram os atores formais. A falta de controle e fiscalização da atividade dos players informais favorece a ocorrência de externalidades negativas à própria cadeia, tais como o não aproveitamento integral das partes e peças dos EEE coletados e a exposição das pessoas envolvidas aos riscos associados ao contato desprotegido com materiais e componentes deletérios.

Uma parcela desses players informais é motivada pela autossustentabilidade e que, por esta razão, a formalização desses atores no contexto regulatório e econômico atual poderia inviabilizar sua atuação e, conseqüentemente, ameaçar sua sobrevivência.

A falta de oferta de estímulos e a falta de comunicação com o consumidor foram apontados como gargalos relacionados ao mercado uma vez que, segundo os entrevistados, compete a esses players (fabricantes, importadores, distribuidores e varejistas) o desenvolvimento de estratégias mercadológicas para levar informação, gerar conscientização e incentivar o descarte.

A centralização geográfica dos players atuantes na indústria de manufatura reversa no sul e sudeste do país é resultante de políticas e processos de industrialização focadas nessas regiões e que acabaram por desfavorecer o desenvolvimento de negócios em outras partes do Brasil. Os efeitos desse gargalo são potencializados pelas dimensões continentais do país que, conforme comentado anteriormente, tornam os custos logísticos com o transporte de bens e materiais entre os locais de coleta e tratamento inviáveis à operação.

O desincentivo à cultura de reparo refere-se à prática deliberada de empresas do setor de EEE de desarticular suas redes de assistência técnica e reparo e de venda de peças, partes e componentes.

Os gargalos relacionados ao **design** dos EEE referem-se a maneira com que os EEE são produzidos atualmente, com a utilização de peças específicas (não universais) e de diversos tipos diferentes de materiais que são misturados, dificultando sua separação, extração e reinserção na cadeia produtiva como matéria-prima secundária. Além disso, o acoplamento das partes e componentes é feito utilizando colagens e juntas de difícil desmontagem. Por fim, não se pratica a identificação e classificação de materiais na montagem.

5. Considerações finais

A presente pesquisa teve objetivo identificar os gargalos existentes da cadeia de revalorização de REEE brasileira na visão de diferentes stakeholders por meio da realização de entrevistas semiestruturadas com *stakeholders* do SLR deste tipo de resíduo no Brasil.



Os resultados apontaram para a existência de cinco tipos diferentes de gargalos relacionados à logística, à regulamentação do setor, ao consumidor, ao mercado e ao design dos EEE. Estudos futuros devem explorar possíveis soluções para o aprimoramento da cadeia de revalorização de REEE.

Vale ressaltar que a pesquisa utilizou abordagem qualitativa para a coleta dos dados, induzindo inferências a partir dos dados coletados por meio de entrevistas com uma amostra de 12 *stakeholders*. Pesquisas de abordagem quantitativa e/ou com conjuntos amostrais distintos de partes interessadas podem ampliar os resultados verificados.

Esta pesquisa contribui em termos práticos ao identificar quem são os atores da cadeia de revalorização de REEE brasileira e seus respectivos papéis, e os gargalos existentes nessa cadeia. Os resultados verificados podem apoiar a análise e a tomada de decisões para endereçamento de soluções, tanto por *players* do setor privado, quanto por formuladores de políticas públicas.

Referências

ABINEE. **A indústria elétrica e eletrônica impulsionando a economia verde e a sustentabilidade**. [s.l: s.n.].

ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. [s.l: s.n.].

BOWEN, G. A. Naturalistic inquiry and the saturation concept: A research note. **Qualitative Research**, v. 8, n. 1, p. 137–152, 2008.

BRASIL. **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. Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Acordo setorial para implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes**. Brasília/DF, 2019.

BRASIL. **Decreto 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 de uso doméstico e seus componentes. Brasília, 2020.

BRASIL. **Lei nº 14.260, de 8 de dezembro de 2021**. Estabelece incentivos à indústria da reciclagem; e cria o Fundo de Apoio para Ações Voltadas à Reciclagem (Favorecicle) e Fundos de Investimentos para Projetos de Reciclagem (ProRecicle). Brasília, 2021.

BRITO, J. L. R. de *et al.* Reverse Remanufacturing of Electrical and Electronic Equipment and the Circular Economy. **Revista de Gestão**, 2022.

CRESWELL, J. W.; CRESWELL, J. D. **Research design: qualitative, quantitative and mixed methods approaches**. 5ª ed. Los Angeles: Sage Publications, 2018.

EMF. **Uma economia circular no Brasil: Uma abordagem exploratória inicial**. [s.l: s.n.].



- FLICK, U. **Introdução à metodologia de pesquisa: um guia para iniciantes**. Porto Alegre: Penso, 2013.
- FORTI, V. *et al.* **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. Bonn/Geneva/Rotterdam United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), 2020.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 6^a ed. São Paulo: Editora Atlas, 2008.
- GRECO, P. J. *et al.* Evidência de validade do teste de conhecimento tático processual para orientação esportiva. **Revista Brasileira de Educação Física e Esporte**, v. 29, n. 2, p. 313–324, 2015.
- GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil**, 2021. [s.l: s.n.].
- GUARNIERI, P.; CERQUEIRA-STREIT, J. A.; BATISTA, L. C. Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil towards a transition to circular economy. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 153, n. October 2018, p. 104541, 2020.
- HERMIDA, P. M. V.; ARAÚJO, I. E. M. Elaboração e validação do instrumento de entrevista de enfermagem. **Revista Brasileira de Enfermagem**, v. 59, n. 3, p. 314–320, 2006.
- MARCONI, M.; LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. [s.l: s.n.]
- MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília, 2022.
- NOWAKOWSKI, P.; MRÓWCZYŃSKA, B. Towards Sustainable WEEE Collection and Transportation Methods in Circular Economy - Comparative Study for Rural and Urban Settlements. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 135, n. January 2017, p. 93–107, 2018.
- OTTONI, M.; DIAS, P.; XAVIER, L. H. A Circular Approach to the E-Waste Valorization through Urban Mining in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 120990, 2020.
- REBEHY, P. C. P. W. *et al.* Reverse logistics systems in Brazil: Comparative study and interest of multistakeholders. **Journal of Environmental Management**, v. 250, n. June, p. 109223, 2019.
- SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4^a ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- SOUZA, R. G. *et al.* Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 41–51, 2015.
- THOMPSON, S. **Sampling**. 3^a ed. [s.l.] Wiley, 2012.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

UNIÃO EUROPEIA. **Diretiva 2002/96/CE** do Parlamento Europeu e do Conselho relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), 2003.

XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; LEPAWSKY, J. Circular Economy and E-Waste Management in the Americas: Brazilian and Canadian Frameworks. **Journal of Cleaner Production**, v. 297, p. 126570, 2021.



PANORAMA DA GESTÃO DOS RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NA BACIA TIETÊ-JACARÉ (SP)

Cleyse Kelly Barbosa Nunes^{1*}; Júlia Fonseca Colombo Andrade¹; Valdir Schalch¹

¹ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

*cleysekbn@gmail.com

Resumo

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) tem se tornado um grande problema, em virtude do seu potencial de contaminação e significativo aumento de geração per capita. Informações sobre o diagnóstico desse tipo de resíduo nos municípios brasileiros são escassas. Contudo, para que ações sejam tomadas, é necessário tornar conhecido o panorama da situação municipal, para que a gestão e gerenciamento dos REEE tornem-se efetivos. Com esse propósito, este trabalho tem por objetivo obter um panorama referente à gestão e gerenciamento dos REEE na Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré situado no Estado de São Paulo por meio de dados secundários obtidos em sites institucionais. Os dados secundários foram coletados dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), quando este não estava disponível, foram coletadas informações a partir dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB). Foi também pesquisado os pontos de coleta existentes no município sob responsabilidade das entidades gestoras. Como resultado, pode-se observar que os municípios integrantes da Bacia Tietê-Jacaré possuem poucas iniciativas de coleta e destinação adequada dos resíduos eletroeletrônicos. Há, inclusive, registro desse tipo de resíduo sendo destinado aos lixões e aterros sanitários. O diagnóstico feito pelo município são escassos de informações precisas. O que pode ser ocasionado em virtude do Decreto sobre a Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos ter sido publicado somente em 2020, e a maioria dos PMGIRS e PMSB serem elaborados em datas anteriores.

Palavras-chave: Resíduos eletroeletrônicos; Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos; Bacia hidrográfica do Tietê-Jacaré; Logística Reversa; Gestão de Resíduos.

1. Introdução

Em 2019, cerca de 53,6 milhões de toneladas de Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) foram geradas globalmente, sendo estimado um aumento de pelo menos 40% até 2030 (FORTI et al., 2020). No Brasil, segundo o relatório desenvolvido pela Universidade das Nações Unidas, foram descartados, apenas em 2019, mais de 2 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos, sendo que menos de 3% desse volume foi reciclado (GREEN ELETRON, 2021).

Segundo informações da Green Eletron, que é uma das entidades gestoras responsáveis pela coleta e tratamento adequado dos resíduos de equipamento eletroeletrônico, no ano de 2020 foram coletados e destinados corretamente 88.755 kg de



REEE (ABRELPE, 2022). A parcela de REEE que não é adequadamente coletada, representa risco ao meio ambiente e à saúde devido à composição química desses materiais (JAIN et al., 2023).

Tendo em vista a periculosidade desse tipo de resíduo, a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, torna obrigatória a estruturação e implementação do Sistema de Logística Reversa (SLR), dentre outros, dos produtos eletroeletrônicos e seus componentes. Em 2020, foram regulamentadas normas para a implementação de Logística Reversa (LR) obrigatória de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico no Brasil por meio do Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020 (BRASIL, 2020).

De acordo com o Decreto nº 10.240/2020 é vedado qualquer tipo de comercialização, doação, transferência ou outra forma de destinação dos resíduos eletroeletrônicos descartados ou armazenados nos pontos de recebimento ou nos pontos de consolidação a outros que não participem do sistema de logística reversa.

O Decreto nº 10.240/2020 também estabeleceu uma meta de atendimento e coleta dos REEE. De forma individual ou coletiva as empresas devem, gradualmente (de 2021 até 2025), instalar mais de 5 mil Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) nas 400 maiores cidades do Brasil e coletar e destinar o equivalente em massa a 17% dos produtos colocados no mercado em 2018, ano definido como base. Desta forma, visa minimizar a disposição desses resíduos e conseqüentemente a extração de novas matérias primas.

Para que essa meta seja alcançada é importante primeiramente ter um diagnóstico da situação dos municípios brasileiros e então propor ações que visem aumentar a taxa de coleta e reciclagem dos REEE e caminhar para uma economia mais circular. Desta forma, este trabalho tem por objetivo obter um panorama referentes à gestão e gerenciamento dos REEE na bacia Tietê-Jacaré por meio de dados secundários.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

Este trabalho foi desenvolvido considerando a Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré situada no Estado de São Paulo (Figura 1). De acordo com a Lei nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016, o Estado é dividido em 22 Unidades Hidrográficas de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), com suas respectivas bacias hidrográficas. A Bacia Hidrográfica Tietê-Jacaré está situada na UGRHI 13 (SÃO PAULO, 2016).

A Bacia abriga por volta de 3,6% da população e abrange 34 municípios, sendo eles: Agudos, Araraquara, Arealva, Areiópolis, Bariri, Barra Bonita, Bauru, Boa Esperança do Sul, Bocaina, Boracéia, Borebi, Brotas, Dois Córregos, Dourado, Gavião Peixoto, Iacanga, Ibaté, Ibitinga, Igarapu do Tietê, Itaju, Itapuí, Itirapina, Jaú, Lençóis Paulistas, Macatuba, Mineiros do Tietê, Nova Europa, Pederneiras, Ribeirão Bonito, São Carlos, São Manuel, Tabatinga, Torrinha, Trabiçu (COMITÊ DA BACIA..., 2016).



Figura 1 - Mapa de localização da Bacia Hidrográfica do Tietê-Jacaré
Fonte: SIGRH, 2023.

Possui uma área de drenagem de 11.757 km² (PERH, 2020), com uma população de 1.462.855 habitantes (IBGE, 2022). Seus principais rios são: Tietê, Jacaré-Guaçu e Jacaré-Pepira. As principais atividades econômicas estão ligadas à agroindústria (açúcar, álcool, processamento de cítricos), indústrias de papel, bebidas, calçados e metal mecânica (PERH, 2016).

2.2 Coleta de dados

Para diagnosticar a situação dos resíduos eletroeletrônicos na Bacia em questão, foram utilizadas informações de dados secundários obtidas em sites institucionais (CONESAN, 2023). Os dados secundários foram coletados dos Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS), quando este não estava disponível, foram coletadas informações a partir dos Planos Municipais de Saneamento Básico (PMSB) de cada município integrante da UGRHI 13.

De cada PMGIRS ou PMSB foram analisados os seguintes questionamentos:

- Possui PMGIRS?
- Ano de elaboração;
- O documento traz alguma informação sobre resíduos eletroeletrônicos?
- Possui ações registradas em relação aos resíduos eletroeletrônicos? Se sim, quais?



- De quem são as iniciativas: públicas ou privadas?
- Possui dados de coleta ou metas/diretrizes para os resíduos eletroeletrônicos?
- Qual o destino ou disposição final dos resíduos eletroeletrônicos?
- Possui lei municipal específica para a logística reversa dos resíduos eletroeletrônicos?
- Possui algum termo de compromisso firmado?

Foi também pesquisado os pontos de coleta existentes no município sob responsabilidade das entidades gestoras. As entidades gestoras responsáveis por operacionalizar o Sistema de de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos no Brasil são a Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE) e a Green Eletron – Gestora para Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos.

Para verificação dos pontos de recebimento de resíduos eletroeletrônicos instalados pelas entidades gestoras, foi pesquisado nos sites oficiais das mesmas. Estas possuem uma ferramenta de busca por CEP (ABREE) e por endereço (Green Eletron). Para a busca no site da ABREE, era necessário inserir o CEP e o resíduo desejado para descarte. Para o site da ABREE, foi pesquisado o CEP geral de cada município e selecionado os itens “celular portátil” e “geladeira”, visto que a depender do porte do resíduo, alguns municípios só possuem pontos de recebimento para equipamentos de pequeno porte, como exemplo o celular. Para a busca no site da Green Eletron, foi apenas necessário inserir algum endereço, foram escolhidos endereços aleatórios de ruas situadas no Centro de cada município.

3. Resultados e Discussão

Para construção deste panorama sobre resíduos eletroeletrônicos, foi pesquisado os PMGIRS ou PMSB de cada município integrante da UGRHI 13. A Figura 2 mostra que apenas 23 municípios possuem PMGIRS, 7 possuem apenas o PMSB e 4 não possuem informações disponíveis nem do PMGIRS e nem do PMSB nos sites institucionais do Estado de São Paulo (CONESAN, 2023).

Dentre os 34 municípios analisados, 24 deles trazem alguma informação sobre os resíduos eletroeletrônicos (Figura 3). Enquanto que 6, apesar de terem PMGIRS ou PMSB, não trazem nenhuma menção, diagnóstico, caracterização ou ações relacionadas aos resíduos eletroeletrônicos.

Dentre os 24 municípios supracitados, apenas 16 deles trazem informações de ações tomadas para coleta e destinação dos resíduos eletroeletrônicos. O que corresponde a 47,1% do total dos 34 municípios (Figura 4).



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

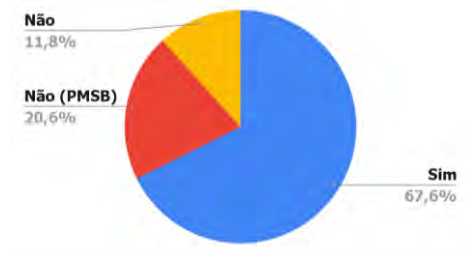


Figura 2 - Disponibilidade do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
Fonte: AUTOR, 2023.

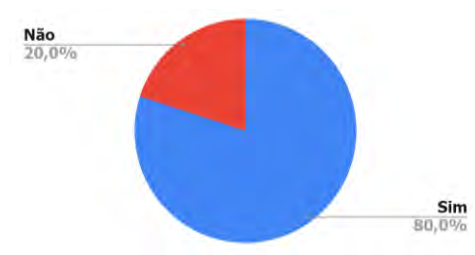


Figura 3 - Registro de informações sobre resíduos eletroeletrônicos
Fonte: AUTOR, 2023.

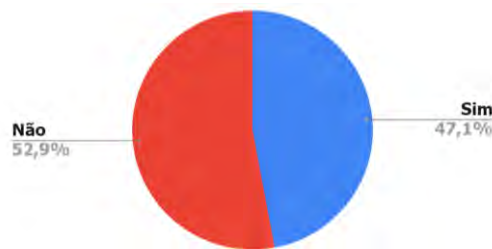


Figura 4 - Registro de ações vinculadas aos resíduos eletroeletrônicos
Fonte: AUTOR, 2023.

O Quadro 1 apresenta informações sintetizadas de cada município que realiza ou realizou alguma ação em relação a coleta e/ou destinação dos resíduos eletroeletrônicos, bem como os municípios que possuem metas ou diretrizes para os resíduos eletroeletrônicos.

Ano (Tipo de Plano consultado)	Município	Ações Registradas	Registro de Coleta	Iniciativa	Metas ou Diretrizes
2012 (PMGIRS)	Agudos	Projeto Eletro-Lixo	-	Público - Privada	Coletar 22.250 kg; Implantar legislação municipal sobre REEE
2013 (PMGIRS)	Araraquara	Possui pontos de Entrega Voluntária	-	Público	Ações informativas e educacionais; Criação de um Plano de gerenciamento de REEE; programas para encerramento da disposição irregular dos resíduos REEE
2012 (PMGIRS)	Arealva	-	-	Público - Privada	Consórcio intermunicipal para execução do Projeto Natureza Limpa
2018 (PMSB)	Areiópolis*	-	-	-	-
2015	Bariri	Ecoponto	-	Público -	-



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

(PMGIRS)				Privada	
2015 (PMSB)	Barra Bonita	Autoriza o poder executivo a firmar convênio para coleta dos REEE	-	-	-
2014 (PMSB)	Bauru	Realizou a gravimetria e possui 7 ecopontos	-	Público	-
2018 (PMGIRS)	Boa esperança do sul*	-	-	-	-
2012 (PMGIRS)	Bocaína	Realiza campanhas de coleta de REEE	-	Público	-
2015 (PMGIRS)	Boracéia	Realiza campanhas de coleta de REEE	-	Público - Privada	Manter o Mutirão do Lixo Eletrônico, implantar um ponto permanente de eletroeletrônicos no município e realizar conscientização ambiental permanente
2019 (PMGIRS)	Borebi	Projeto Lixo Eletrônico	-	Público	-
2014 (PMGIRS)	Brotas	Realiza campanhas de coleta de REEE e existem ecopontos em alguns comércios	300 kg/mês ou 2 m ³ coletados em um mutirão	Público - Privada	Aumentar a coleta em 30% até jan/2015
2016 (PMGIRS)	Dois córregos	Ecopontos	Estima-se que coleta 6 toneladas por ano (pilhas, baterias e eletrônicos)	Público	-
-	Dourados**	-	-	-	-
-	Gavião Peixoto**	-	-	-	-
2013 (PMGIRS)	Iacanga	Possui 3 ecopontos e realiza campanhas de coleta de REEE	250 kg no último mutirão	Público	-
2017 (PMSB)	Ibaté	Possui dados de uma pesquisa falando do destino que a população dá para os REEE	-	-	-



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

2012 (PMGIRS)	Ibitinga*	-	-	-	
2012 (PMGIRS)	Igaraçu do Tietê	Possui 1 ecoponto	-	Público	-
2014 (PMSB)	Itaju	Não há campanhas e nem pontos fixos de recebimento	-	-	Criar ecopontos e contratar empresas especializadas para dar a destinação adequada.
2013 (PMGIRS)	Itapuí	Não há campanhas e nem pontos fixos de recebimento	-	-	Realizar campanhas de coleta, armazenar e enviar para uma empresa privada de reciclagem em Bauru
2016 (PMSB)	Itirapina*	-	-	-	-
2013 (PMSB)	Jaú*	-	-	-	-
2013 (PMGIRS)	Lençóis Paulista	Realizou gravimetria e possui 7 pontos de coleta	29,9 toneladas por ano	Público	-
2013 (PMGIRS)	Macatuba	Projeto Lixo Rico		Público	Criar procedimentos para recebimento de E-lixo
2017 (PMGIRS)	Mineiros do Tiete	-	-	-	Instalação de ecoponto que pode ser móvel; firmar parcerias através de termo de compromisso
2021 (PMGIRS)	Nova Europa	Não há campanhas e nem pontos fixos de recebimento	Uma parte é reaproveitada pelos prestadores de serviço na área de Informática	Privado	Recolher 10,2 kg/hab/ano
2011 (PMGIRS)	Perdeneiras*	-	-	-	
-	Ribeirão Bonito**	-	-	-	
2019 (PMGIRS)	São Carlos	Possui dados de gravimetria e possui ecopontos	Foram coletados por uma iniciativa privada de 2018 a 2019 824 dispositivos	Público - Privada	-



			equivalentes a 540 kg de REEE		
2013 (PMGIRS)	São Manuel	Estabelece responsabilidades para o setor público e privado	-	-	Elaboração de Plano de Gerenciamento dos REEE pelo poder público e privado
2018 (PMGIRS)	Tabatinga	Não há campanhas e nem pontos fixos de recebimento		-	Executar a lei já existente sobre coleta, destinação correta de materiais eletroeletrônicos em desuso
2014 (PMGIRS)	Torrinha	Possui 2 ecopontos	-	Público	-
-	Trabiju**	-	-	-	-

Quadro 1 - Síntese das informações municipais sobre os resíduos eletroeletrônicos

*Municípios que não trazem nenhuma menção, diagnóstico, caracterização ou ações relacionadas aos resíduos eletroeletrônicos

** PMGIRS e PMSB indisponíveis

Fonte: Autor, 2023.

De acordo com a composição gravimétrica que consta nos PMGIRS de Bauru, Lençóis Paulista e São Carlos, 0,25%, 0,57% e 0,68% dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são eletroeletrônicos, respectivamente. Não há informações sobre a quantidade gerada em nenhum dos municípios da Bacia Tietê-Jacaré. Segundo estimativas de Rodrigues, Gunther e Boscov (2015), a geração per capita no município de São Paulo é de 4,8 kg/hab/ano, considerando este mesmo valor, na bacia estudada são gerados cerca de 7725 toneladas anualmente. Sendo que a maior parte destes resíduos não são destinados de forma adequada.

Conforme o PMSB de Ibaté, na zona urbana o descarte em lixo comum é predominante, porém, parte dos entrevistados tem preferência por destinar à reciclagem, pontos de coleta, ferro velho, mercado e escola. Enquanto que na zona rural todos os entrevistados relataram que fazem o descarte no lixo comum, como mostra a Figura 5.

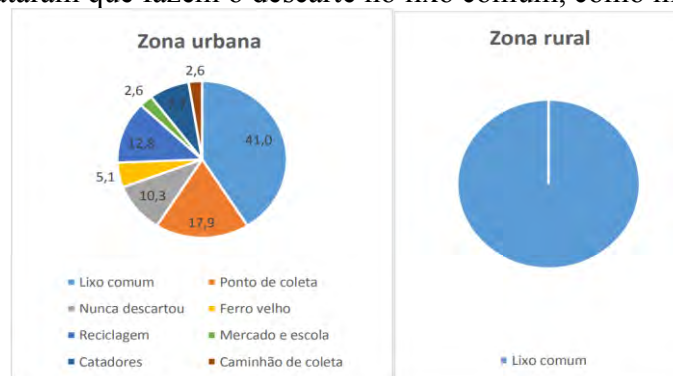


Figura 5 - Resposta da pergunta “Onde você descarta eletrônicos”, questionário aplicado na zona urbana e rural de Ibaté, em porcentagem

Fonte: PMSB Ibaté, 2017.



Apesar de nos outros planos não terem sido evidenciados a composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos ou domiciliares, essa pode ser uma característica comum aos outros municípios, terem seus resíduos eletroeletrônicos sendo descartados nos lixões ou aterros sanitários. A caracterização gravimétrica dos 3 municípios supracitados, evidencia a ocorrência de descarte inadequado de REEE. Mesmo os 3 municípios possuindo ecopontos, ainda há presença de eletroeletrônicos nos RSU. Os municípios que não apresentam iniciativas de coleta por parte do setor público ou privado, pode acabar apresentando a mesma realidade que o município de Itapuí, que relata em seu PMGIRS que 100% desse tipo de resíduo é destinado ao aterro sanitário.

Apesar de não haver campanhas e nem pontos fixos de recebimento em Nova Europa, seu PMGIRS se destaca entre os municípios da Bacia Tietê-Jacaré. O Plano traz informações detalhadas do diagnóstico dos REEE no município. Traz projeções, de 2021 a 2041, da geração de REEE e estabelece uma projeção de metas de reciclagem e destinação adequada para o município, a partir de 2021 ano a ano até 2041. O município ainda define as diretrizes e estratégias, organizando em metas de imediato, curto, médio e longo prazo, e por fim, estabelece programas e ações para os resíduos eletroeletrônicos.

Sobre o destino dado aos resíduos eletroeletrônicos, apenas 10 municípios registram que os resíduos coletados são destinados a empresas privadas para destinar à reciclagem; apenas 1 relatou que faz o reuso, usando para informatizar entidades locais, visando a inclusão digital; e apenas 1 relatou que parte do material é triado e vendido pelos catadores.

Dos 34 municípios, 2 possuem legislações municipais para os resíduos eletroeletrônicos e 2 municípios expressam interesse em criar uma lei municipal para esse fim. Nenhum dos municípios analisados possui termo de compromisso firmado entre setor público e privado.

De acordo com o Decreto nº 10.240/2020, em seu art. 48 § 2º, “cada Município atendido pelo sistema de logística reversa constante do Anexo III, instalará, no mínimo, um ponto de recebimento a cada vinte e cinco mil habitantes” (BRASIL, 2020). Os municípios que integram essa lista possuem uma população acima de 80 mil habitantes. Da UGRHI 13, estão presentes apenas Araraquara, Bauru, Jaú e São Carlos. De acordo com o Decreto, cada um desses municípios deveriam ter pelo menos 10, 15, 3 e 10 pontos de recebimento de REEE, respectivamente.

O Quadro 1 mostra que Araraquara, Bauru e São Carlos possuem pontos de recebimento sob iniciativa pública ou público-privada. Enquanto que Jaú não faz qualquer menção em seu Plano sobre os REEE. O Decreto deixa claro que os municípios não são encarregados de executar as ações e atividades que são por obrigação dos fabricantes, dos importadores, dos distribuidores e dos comerciantes. Contudo, os municípios podem realizar, em caráter voluntário, campanhas ou programas paralelos de destinação final ambientalmente adequada de produtos eletroeletrônicos.

Os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes podem operacionalizar o sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de forma individual ou coletiva, por meio de entidades gestoras. As entidades gestoras ABREE e Green Eletron possuem pontos de recebimentos em alguns dos municípios da Bacia estudada, conforme pode ser observado no Quadro 2.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

Município	População (habitantes)	Quantidade de Pontos de Recebimento
Agudos	37.680	1 - Lojas Vivo (ABREE)
Araraquara	242.228	4 - Lojas Vivo (ABREE) 2 - Magazine Luiza (ABREE) 2 - Casas Bahia (Green Eletron)
Arealva	8.130	1 - Lojas Vivo (ABREE)
Bariri	31.595	1 - Lojas Vivo (ABREE)
Barra Bonita	34.346	1 - Lojas Vivo (ABREE) 1 - Casas Bahia (Green Eletron)
Bauru	379.146	4 - Lojas Vivo (ABREE) 3 - Magazine Luiza (ABREE) 1 - Do Lar Eletro Tecnica LTDA (ABREE) 1 - Vertico Bauru Empreendimentos Imobiliários LTDA (ABREE) 1 - C & C BAURU(ABREE) 1 - MotoStore Bauru (Green Eletron) 3 - Casas Bahia (Green Eletron) 1 - Makro (Green Eletron)
Dourados	8.096	3 - Lojas Vivo (ABREE) 2 - Magazine Luiza (ABREE) 2 - Casas Bahia (Green Eletron)
Ibaté	32.178	1 - Lojas Vivo (ABREE)
Igarapu do Tietê	23.106	1 - Casas Bahia (Green Eletron)
Jau	133.497	1 - Casas Bahia (Green Eletron)
Lençóis Paulista	66.505	3 - Lojas Vivo (ABREE) 1 - Magazine Luiza (ABREE) 1 - Casas Bahia (Green Eletron)
Perdeneiras	44.827	1 - Lojas Vivo (ABREE) 1 - Casas Bahia (Green Eletron)
Ribeirão Bonito	10.989	1 - Lojas Vivo (ABREE)
São Carlos	257.822	3 - Lojas Vivo (ABREE) 1 - Magazine Luiza (ABREE) 1 - Casas Bahia (Green Eletron) 1 - Ponto Frio (Green Eletron)
São Manuel	37.289	1 - Lojas Vivo (ABREE)
Tabatinga	14.769	1 - Lojas Vivo (ABREE)

Quadro 2 - Pontos de recebimento de REEE nos municípios da Bacia Tietê-Jacaré

Fonte: Adaptado dos sites oficiais da ABREE e Green Eletron,.

Na Bacia Hidrográfica Tietê Jacaré, dentre os 34 municípios, 16 municípios possuem pontos de recebimento sob encargo das entidades gestoras responsáveis por operacionalizar o sistema de logística reversa dos produtos eletroeletrônicos. No total são 58 pontos de recebimento. Nos municípios integrantes da lista do Decreto nº 10.240/2020, somente Bauru possui a quantidade de pontos de recebimento exigida pela legislação.



Todavia, é possível observar que mesmo não sendo exigido por Lei, os municípios com menos 80 mil habitantes também estão sendo contemplados com os pontos para a destinação correta dos REEE.

De acordo com o relatório anual de acompanhamento e performance da Green Eletron (GREEN ELETRON, 2022), em 2021, foram coletadas 118,7 toneladas de REEE no Estado de São Paulo. Já o Relatório anual de desempenho da ABREE (ABREE, 2022), registra a coleta de 1.084,05 toneladas de REEE no Estado de São Paulo em 2021, sendo o responsável pela maior quantidade de REEE coletado.

4. Considerações Finais

Conforme dados disponibilizados pelos PMGIRS e PMSB analisados, os municípios da Bacia Tietê-Jacaré possuem poucas iniciativas de coleta e destinação adequada dos resíduos. Há registro de REEE sendo destinado aos lixões e aterros sanitários. O diagnóstico feito pelo município são escassos de informações precisas sobre esse tipo de resíduo e seu destino. O que pode ser ocasionado em virtude do Decreto sobre a Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos ter sido publicado somente em 2020, e a maioria dos PMGIRS e PMSB serem elaborados em datas anteriores. Desse modo, para as revisões dos próximos PMGIRS e PMSB, é premente um diagnóstico detalhado para que a gestão e gerenciamento dos REEE seja realizado de forma eficiente.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

ABREE - Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos. **Relatório Anual de Desempenho do Sistema de Logística Reversa (SLR) de Eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico**. São Paulo, 2022. 41 p. Disponível em: https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/12/Relatorio_Anuual_de_Desempenho_ABREE_ano-referencia-2021.pdf. Acesso em: 31 jul. 2023.

ABRELPE- Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo, 2022. 64 p

BRASIL. **Decreto 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. Brasília, DF: Palácio do Planalto. 2020. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>. Acesso em: 08 set. 2022.

CONESAN. **Planos de Saneamento Básico**. Secretaria de Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística. Disponível em: <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/conesan/planos-de-saneamento-basico/>. Acesso em: 26 jul. 2023.



COMITÊ DA BACIA HIDROGRÁFICA DO TIETÊ -JACARÉ. **Relatório de situação dos recursos hídricos 2016**: ugrhi 13 - bacia hidrográfica tietê - jacaré. São Paulo, 2016. 126 p. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents//CBH-TJ/11832/2016-12-12-relatorio-situacao-ugrhi13.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2023.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G.. **The Global E-waste Monitor 2020**: quantities, flows, and the circular economy potential. [S.L.]: Unitar United Nations Institute For Training And Research, 2020. 120 p. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf. Acesso em: 23 jul. 2023.

GREEN ELETRON. **Relatório anual de acompanhamento e performance da logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes**. São Paulo, 2022. 100 p. Disponível em: https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/12/Relatorio_Anuar_de_Desempenho_Green-Eletron_ano-referencia-2021.pdf. Acesso em: 31 jul. 2023.

GREEN ELETRON. **Resíduos Eletroeletrônicos no Brasil-2021**. São Paulo, 2021. 20 p. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf. Acesso em: 25 jul.2023

JAIN, M.; MUDAR, D.; CHAUDHARY, J.; KUMAR, S.; SHARMA, S.; VERMA, A.S.Review on E-waste management and its impact on the environment and society. **Waste Management Bulletin**, v. 1, n. 3, p. 34-44, 2023

PERH - Plano Estadual de Recursos Hídricos. **Subsídios Técnicos para o Plano Estadual de Recursos Hídricos 2020-2023**: 2. São Paulo: Cobrape, 2020. 257 p. (Volume I - Tomo I). Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/corhi/planoestadualderecursosohidricos>. Acesso em: 28 jul. 2023.

RODRIGUES, A.C.; GUNTHER, W.M.R.; BOSCOV, M.E.V. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**,v.20 ,n.3, p.437-447, 2015.

SÃO PAULO (Estado). **Lei nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016**. Dispõe sobre o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH e dá providências correlatas. São Paulo, Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2016/lei-16337-14.12.2016.html>. Acesso em: 27 jul. 2023.

SIGRH - Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo (org.). **Apresentação**. Disponível em: <https://sigrh.sp.gov.br/cbhtj/apresentacao>. Acesso em: 27 jul. 2023.



POLÍTICA PÚBLICA PARA A ECONOMIA CIRCULAR: uma avaliação do Programa *Sukatech*

Valquíria Duarte Vieira Rodrigues (Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de Goiás – SECTI e Universidade Federal de Goiás/UFG). valquiria.rodrigues@goias.gov.br

Fabricio Alves Freitas (SECTI). fabricio.afreitas@goias.gov.br

Guilherme Resende Oliveira (SECTI e UniAlfa). guilherme.resende@goias.gov.br

Thiago Angelino Martins da Silva (SECTI). thiago.silva@goias.gov.br

Resumo

O objetivo do estudo foi analisar o papel da política pública para a implementação de um modelo econômico sob a perspectiva da Economia Circular (EC). Para tanto, foi realizada uma avaliação *ex-post* do programa de gestão de resíduos eletroeletrônicos, *Sukatech*, implementado em 2021 pela Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de Goiás (SECTI). A coleta de dados se deu por meio da observação sistemática, do acompanhamento da rotina, eventos e fatos do Programa estudado, por meio de participação ativa e presencial. A análise de documentos complementa a pesquisa ao passo que levanta informações do exercício observado em 2019. A análise dos dados utilizou a técnica análise de conteúdo temática de Bardin (1977), com categorização a posteriori. Os principais resultados indicam a gestão de resíduos sólidos e eletrônicos, educação ambiental de jovens e adultos e melhoria na implementação e a condução de ações outras ambientais. Em termos práticos, destacam-se o recondicionamento de mais de 700 computadores, capacitação de 1000 estudantes e coleta de 264 toneladas de resíduos, dos quais mais da metade teve sua destinação adequada. Assim, o programa transformou seus processos produtivos lineares e circulares por meio do prolongamento da vida útil do que será produzido, reprocessamento de co-produtos e reintegração deles nos processos fabris visando aumentar o ciclo de vida. Esse trabalho contribui ao evidenciar um caso concreto e de sucesso no Brasil sobre Política Pública de EC que pode servir de modelo para outras iniciativas governamentais.

Palavras-chave: Economia Circular; Resíduos eletrônicos; Avaliação de políticas públicas.

1. Introdução

As discussões sobre produção e meio ambiente se tornam cada vez mais presentes no âmbito industrial e nas agendas públicas, visto que a demanda por bens de consumo e recursos naturais tem aumentado. Nesse contexto é preciso buscar formas de gestão que visem a preservação do meio ambiente, numa conjuntura que busca garantir que os mesmos recursos de hoje estejam disponíveis para as próximas gerações.



Nesse sentido, a gestão ambiental e a economia circular contribuem para o desenvolvimento sustentável e se destacam junto à Gestão Ambiental as empresas se organizam com o intuito de alcançar e conquistar a qualidade ambiental alinhado com o tripé sociedade, mercado e governo (BARBIERI, 2016).

A economia circular, por meio de processos produtivos circulares, objetiva reinserir os resíduos no ciclo produtivo, para minimizar os impactos ao meio ambiente, e também, reduzir a extração de matéria prima (FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016; SILVA et al., 2021). Esses modelos emergem diante da preocupação com a sustentabilidade versus o modelo econômico linear, em que a gestão ambiental eficiente pode contribuir para a transição de produção linear para um modelo de produção circular.

Assim, segundo Assunção (2019), a economia circular se apresenta como oposição ao modelo econômico linear de produção – extrair, transformar, descartar –, que depende de grandes quantidades de materiais e recursos ambientais, para um sistema circular de produção, distribuição e consumo, que visa a redução, reutilização e a reciclagem (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018; KORHONEN et al., 2018).

O mundo deve produzir cerca de 50 milhões de toneladas de lixo eletroeletrônico em 2020. Sendo os resíduos eletroeletrônicos são compostos por equipamentos elétricos e eletrônicos, além de suas partes e acessórios, que foram descartados pelo seu proprietário como resíduos, ou seja, sem a intenção de utilizá-los. Também conhecidos como lixo eletrônico, esse material contamina solo, águas superficiais, águas subterrâneas e prejudicam a saúde de animais e humanos quando descartado de forma inadequada.

Goiás, com seus 7,2 milhões de habitantes, tinha aproximadamente 92,9% da população com cobertura de coleta domiciliar de resíduos sólidos, em 2021, de acordo com informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). No entanto, apenas 49 municípios, dos seus 246, tinham coleta seletiva. Em todo o estado haviam 18 aterros sanitários, 31 aterros controlados e 146 lixões, sendo que 48,4% da disposição final dos resíduos sólidos urbanos iam para os primeiros e 34,8% eram destinados para os lixões.

Nesse contexto, em 2021 foi criado pelo Governo de Goiás o programa Sukatech, gerido pela Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI) em parceria com a Organização da Sociedade Civil (OSC) Programando o Futuro, que tem em sua concepção ações que aliam sustentabilidade e desenvolvimento social.

Em 2010, foi promulgada a Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Essa lei compartilha a responsabilidade da destinação correta desses resíduos com os fabricantes, distribuidores, varejistas e com o consumidor. Dessa forma, se faz necessário à idealização e a implementação de política pública voltada ao descarte correto de resíduos. Conforme regulamentado pelo Decreto 9.718/2020, que criou o programa, a administração pública estadual, direta, autárquica e fundacional tem a responsabilidade e a incumbência de comunicar ao órgão administrador do Programa Sukatech a existência de equipamentos de informática e eletroeletrônicos classificados como ociosos, recuperáveis, antieconômicos ou



irrecuperáveis, sendo um instrumento fundamental para implementação de políticas públicas de recondicionamento e economia circular.

Por meio do programa, o governo do estado mantém um Centro de Reconcondicionamento de Computadores (CRC) que recebe resíduos eletrônicos e realiza a reciclagem e o recondicionamento, contribuindo com a preservação do meio ambiente. O Sukatech ainda realiza a capacitação de jovens e adultos na área de tecnologia. Durante os cursos de informática básica, manutenção de computadores e robótica, os estudantes aprendem de maneira prática, utilizando os resíduos eletroeletrônicos. Depois, os eletrônicos reconicionados são doados a entidades filantrópicas ou públicas.

Nesse sentido, o presente estudo objetiva suprir essa lacuna, uma vez que é preciso que se progrida nas formulações de políticas públicas na transição de um modelo de gestão alinhado com os conceitos de economia circular. Diante do contexto da PNRS, a Logística Reversa dos eletroeletrônicos está no escopo das ações obrigatórias. Assim, o objetivo deste foi analisar o papel da política pública para a implementação de um modelo econômico sob a perspectiva da Economia Circular (EC).

Para atingir o objetivo proposto pelo presente capítulo será realizado um estudo aplicado do Programa *Sukatech*. Para tanto, será utilizada a técnica análise de conteúdo temática de Bardin (1977), com categorização a posteriori, a fim de realizar a análise dos dados.

O trabalho de introdução, na segunda seção, contém a revisão de literatura com as principais ideias sobre a relação com a gestão ambiental e a economia circular. Na terceira são apresentadas as técnicas e métodos da pesquisa. Posteriormente, são mostrados os resultados e a discussão por meio da categorização. Por fim, constam as considerações finais na quinta e última seção.

2. Políticas públicas: relação com a gestão ambiental e a economia circular

A produção de bens de consumo e serviços tem aumentado de acordo com o crescimento populacional mundial e, conseqüentemente, a demanda por recursos naturais também, exigindo assim, cada vez mais a atenção dos produtores na preservação e conservação dos recursos naturais para manutenção da produtividade e competitividade nacional e internacional, sobretudo, num momento de maior exigência dos mercados em relação aos sistemas de produção mais sustentável (FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016; RIBEIRO; JAIME; VENTURA, 2017; CEPAL, 2019).

Dessa forma, as discussões sobre Brasil hoje é o mercado emergente que gera o maior volume mundial de lixo eletroeletrônico per capita, com 0,5 kg por habitante. Em 2014 gerou aproximadamente 1.100 mil toneladas de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) pequenos, número que aumentou para 1.247 mil toneladas em 2015, segundo estudo da Secretaria de Desenvolvimento da Produção do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (SDP/MDIC) e da Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI).

Contudo, é possível conciliar o aumento da produção de alimentos com a redução dos impactos negativos gerados pela indústria avícola sobre o meio ambiente por meio de soluções tecnológicas. Para tanto, as empresas vêm criando alternativas e



estratégias de controle ambiental e desenvolvendo programas que avaliam os principais aspectos ambientais do processo, ajudando a evitar e minimizar os impactos (PINHEIRO, 2022; BARBIERI, 2016).

Dentre algumas soluções que minimizem os impactos sobre o meio ambiente, pode-se citar: (i) redução na fonte: modificação na fonte ou no processo (housekeeping, substituição de materiais ou mudanças tecnológicas); (ii) reciclagem interna; (iii) reciclagem externa (estruturas ou materiais); (iv) ciclos biogênicos; (v) ecoeficiência; (vi) tecnologias que reduzam e otimizem energia elétrica; (vii) soluções mais sustentáveis; (viii) abordagens mais verdes e inteligentes na logística e transporte; (ix) pegada de carbono; (x) biocombustíveis; (xi) tratamento da águas; entre outros (PINHEIRO, 2022; BARBIERI, 2016).

Portanto, conciliar a produção de alimentos com os recursos ambientais começa a fazer parte das agendas institucionais e provocar mudanças nos processos produtivos agroindustriais. Aliado a isso, é por meio da gestão ambiental que as empresas se organizam com o intuito de alcançar e conquistar a qualidade ambiental através do tripé sociedade, mercado e governo (BARBIERI, 2016; DIAS, 2011; DONAIRE, 1999).

Sendo assim, a gestão ambiental se fundamenta em cinco princípios essenciais: i) Definição de política ambiental; ii) Elaboração de plano de ação a fim de atender à política ambiental; iii) Promoção de condições para o cumprimento dos objetivos e metas traçadas; iv) Realização periódica de avaliações quali-quantitativas; e, v) Revisão e aprimoramento da política ambiental da empresa, assegurando um contínuo desenvolvimento do desempenho ambiental (BARBIERI, 2016; GEDAM, 2021).

Tais princípios seguem as estratégias de gestão de métodos que focam nos problemas ambientais existentes com a finalidade de reduzir os danos originados pelo fluxo dos resíduos gerados. Portanto, a prevenção contra a poluição é uma estratégia de longo prazo que busca reduzir a quantidade de resíduos liberados na natureza (THOMAS; SCOTT, 2015).

Então cabe às empresas atuarem por meio de alguma ação no intuito de reduzir os impactos ambientais gerados pelas suas atividades produtivas. Essas estratégias, no âmbito da gestão ambiental, podem ser por meio do controle da poluição e dos seus efeitos, prevenção do surgimento, ou do desenvolvimento de estratégias que possibilitem transformar os problemas ambientais em oportunidades de negócios (PINHEIRO, 2022; BARBIERI, 2016).

É a partir desse cenário, das atividades produtivas que geram impactos ambientais com a extração de matéria prima e sua consequente produção de resíduos e rejeitos, que se apresenta a economia circular (EC). A EC objetiva processos produtivos circulares, não mais lineares, por meio da reinserção dos resíduos no ciclo produtivo, a fim de minimizar os impactos ao meio ambiente, e também, reduzir a extração de matéria prima (FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016; SILVA et al., 2021).

Segundo Oliveira et al. (2018), os modelos de produção circulares emergem diante dos ideais de sustentabilidade, de ações que resultem no prolongamento da vida útil do que será produzido, ou do reprocessamento de subprodutos e reintegração deles na cadeia produtiva, a fim de aumentar o ciclo de vida. Assim, um sistema de transição para a EC promove um circuito fechado com processo produtivo sustentável, ao passo



que, maximiza o aproveitamento dos recursos e viabiliza ciclos contínuos de reconversão (OLIVEIRA; FRANÇA; RANGEL, 2018; VIER et al., 2021).

Da mesma forma, Cosenza et al. (2019) observam que a EC emerge diante do conflito entre o modelo atual econômico de crescimento versus sustentabilidade ambiental. De modo que a EC vem no intuito de mudar o comportamento do consumidor e utilizar os recursos naturais e resíduos (COSENZA; ANDRADE; ASSUNÇÃO, 2019; VIER et al., 2021).

Portanto, no cenário da gestão ambiental que busca alcançar a qualidade ambiental e reduzir os problemas ambientais oriundos do processo de produção de alimentos, a EC em oposição ao modelo econômico linear de produção de “extrair, transformar, descartar”, do qual depende de grandes quantidades de materiais e recursos ambientais (ASSUNÇÃO, 2019), para um sistema circular de produção, distribuição e consumo, visando a redução, reutilização e a reciclagem (KALMYKOVA; SADAGOPAN; ROSADO, 2018; KORHONEN et al., 2018). A próxima seção apresenta os métodos e técnicas desse estudo aplicado.

3. Métodos e técnicas de pesquisa

Essa pesquisa é classificada como aplicada, descritiva, exploratória e qualitativa. De acordo com Silva e Menezes (2001), a pesquisa aplicada permite conhecer o tema com a aplicação prática para a solução de problemas. Por sua vez, a natureza descritiva e exploratória descreve características da pesquisa com a possibilidade de aplicação de questionário ou observação, e, também proporciona maior aproximação com o problema de forma a compreendê-lo. Já a pesquisa qualitativa, possibilita interpretar fenômenos e atribuição de significados (SILVA; MENEZES, 2001).

O presente estudo definiu a observação sistemática e a análise documental para a coleta de dados acerca do Programa *Sukatech*, na SECTI Goiás. A coleta de dados se deu por meio da observação sistemática, do Programa estudado, por meio de participação ativa e presencial. A análise de documentos complementa a pesquisa ao passo que levanta informações ou dados do exercício observado, que foram os anos de execução do programa, desde sua implementação, 2021 até julho de 2023.

Para analisar os dados, foi utilizada a análise de conteúdo temática. Essa análise se destaca cada vez mais nas ciências sociais aplicadas numa abordagem analítica crítica e reflexiva, que proporciona legitimidade e rigor nas pesquisas, compreendendo em profundidade o significado das falas, de documentos, núcleo de palavras ou mensagens (BARDIN, 1977; MOZZATO; GRZYBIVSKI, 2011). Ela foi composta por três fases e visou conhecer em profundidade a unidade de estudo de forma crítica: (i) pré-análise, (ii) exploração do material; e (iii) tratamento dos resultados, inferência e interpretação (BARDIN, 1977).

Quanto à etapa de categorização temática da análise de conteúdo, foi realizada a posteriori, com a definição baseada no levantamento das ações da gestão ambiental desenvolvidas por meio do Programa *Sukatech* sob a perspectiva da EC, sendo definidas quatro categorias a Política Nacional de Desfazimento e Reestratégia estadual



condicionamento de Equipamentos Eletroeletrônicos e a Estratégia Estadual sobre o Programa *Sukatech*. Os resultados são apresentados na próxima seção.

4. Resultados e discussão

4.1 Política Nacional de Desfazimento e Estratégia estadual condicionamento de Equipamentos Eletroeletrônicos

Segundo relatório da ONU, atualmente o Brasil é considerado o maior produtor de lixo eletrônico na América Latina e o 7º no mundo, chegando a descartar, por ano, 1,5 milhão de toneladas, de acordo com o relatório “Global E-Waste Monitor 2017”, realizado pela Organização das Nações Unidas (ONU, 2019).

O crescente volume de lixo eletrônico, incluindo produtos descartados, como baterias, tomadas/carregadores, celulares, laptops, televisores, refrigeradores e brinquedos eletrônicos, representam um importante ameaça ao meio ambiente e à saúde humana, alertam as Nações Unidas. Em 2016 foram gerados 44,7 milhões de toneladas métricas de resíduos eletrônicos no mundo, um aumento de 8% na comparação com 2014. Especialistas preveem um crescimento de mais 17%, alcançando 52,2 milhões de toneladas métricas até 2021.

Desse modo, no Brasil a Lei Federal nº 14.479, de 21 de dezembro de 2022, instituiu a Política Nacional de Desfazimento e Recondicionamento de Equipamentos Eletroeletrônicos e propôs o Programa Computadores para Inclusão, que tem o objetivo de garantir o pleno exercício do direito ao acesso às tecnologias da informação e comunicação aos cidadãos brasileiros, contribuindo para o descarte de equipamentos e bens de informática da administração pública de maneira correta e sustentável, bem como contribuir para a qualificação profissionalizante da população, estimulando a criatividade, a inovação, a geração de renda, o empreendedorismo e o fomento à pesquisa e ao desenvolvimento de soluções nas áreas de ciência, tecnologia e inovação.

No estado de Goiás, a Lei Estadual 21.983, de 30 de maio de 2023, instituiu a Política Estadual de TI Verde, que tem por objetivo a eliminação verde de computadores antigos e de outros equipamentos eletrônicos, bem como sua reciclagem correta. Assim, o Programa *Sukatech* se coloca como instrumento de alcance do objetivo de descarte correto de resíduos eletrônicos.

4.2 Programa *Sukatech*

Essa subseção aborda metas do Programa *Sukatech*. A primeira meta consiste na adequação e reestruturação do centro de recondicionamento de computadores e a estruturação dos polos descentralizados de economia circular no interior do estado em parceria com prefeituras e outras organizações; a segunda meta diz respeito ao recondicionamento de computadores - coleta/destinação e distribuição de computadores para os pontos de inclusão digital em Goiás, com entrega de *software* de gestão com o objetivo de centralizar os dados gerados de toda a operação; a terceira quarta diz respeito a capacitação de jovens; e a quarta trata das campanhas de educação ambiental.



Meta 1. Adequação e Reestruturação Centro de Recondicionamento de Computadores - CRC

Consiste na estruturação física da Unidade CRC - Polo de Economia Circular com os requisitos mínimos indispensáveis para o beneficiamento de 500 toneladas (250 t/ano) de resíduos eletroeletrônicos para o período da execução do projeto. O CRC é uma Central de Remanufatura, Reciclagem e Suporte, unidade operacional estruturada para fazer a gestão do projeto a partir do desfazimento dos bens de informática e seus derivados do Estado de Goiás.

Eventualmente, são coletados resíduos descartados pela população e empresas em geral através de campanhas e/ou eventos promovidos pelo Governo Estadual. Todavia, o foco do projeto é voltado prioritariamente aos resíduos gerados dentro da máquina estadual goiana.

Meta 2. Recondicionamento de Computadores - Coleta/Destinação e Distribuição de Computadores

Consiste no recondicionamento de 1.500 computadores e na sua destinação para Pontos de Inclusão Digital do Governo de Goiás ou Organizações da Sociedade Civil, durante o período de vigência do projeto. Esta etapa refere-se ao processamento ou recondicionamento dos equipamentos após serem destinados por órgãos governamentais, empresas ou população em geral ao local de funcionamento do Programa e, posteriormente, reutilizados à título de Inclusão Digital e melhorias nos serviços informatizados do governo ou em projetos em parceria com organizações ou outras entidades promotoras de inclusão digital.

Inicia-se, portanto, com a coleta dos equipamentos inservíveis. A coleta dos equipamentos é a ação logística que envolve a parte operacional do recolhimento do resíduo (desde o termo de doação até a documentação da entidade que será beneficiada, passando pela baixa dos bens no patrimônio do órgão que está realizando a doação); a retirada dos bens; a entrega na estação de metarreciclagem para ser recondicionada ou então tratada como lixo eletrônico.

É utilizado um *Software* de Gestão, que objetivou centralizar os dados gerados por toda a operação, como o volume de bens descartados, a origem, modelo, fabricante, número de série, peso, situação física, entre outros.

É disponibilizada uma plataforma de descarte de lixo eletrônico, que conecta os doadores (órgãos públicos, empresas e população em geral) aos parceiros logísticos. Essa plataforma permite acessar informações acerca do descarte de equipamentos, bem como saber o destino dos resíduos após o processo de reciclagem. A plataforma será acessada via internet e aplicativos para celulares (multiplataforma), facilitando o acesso ao serviço.

Por fim, antes do efetivo recondicionamento dos computadores e da plena capacitação dos alunos do CRC, foi realizado um Workshop de Movimentação de Bens, um encontro presencial ou online com os gestores de patrimônio de órgãos públicos do estado, tendo em vista que a criação do Decreto Estadual que regulamenta o Programa *Sukatech* cria um novo modelo sustentável de descarte de equipamentos, materiais e bens de informática da administração pública estadual.



A remanufatura de equipamentos de informática envolve o teste básico de funcionamento, a verificação da configuração (para atender aos requisitos mínimos de doação), troca de peças, lubrificação, limpeza e instalação de softwares.

Todos os equipamentos são repassados para os órgãos internos de governo a título de Inclusão Digital e/ou repassados para entidades do terceiro setor, conforme instrumento jurídico de conveniamento mais adequado para a ocasião.

Meta 3. Capacitação de Jovens

Dispõe sobre a formação de mais de 1.000 jovens em 3 modalidades de cursos - Informática Básica, Manutenção de Computadores e Robótica, com duração média de dois e quatro meses. Os cursos serão oferecidos ao longo de 30 meses, seja na sede do *Sukatech*, no interior do estado em parceria com prefeituras, ou em eventos com parceiros, atendendo no total 1.000 jovens nesse período.

Esta meta atende à proposta de formação de jovens nas tecnologias desenvolvidas no Polo de Economia Circular do Programa *Sukatech*, com conteúdo teórico e prático, visto que os jovens poderão vivenciar as atividades do Polo. Tem como foco o ingresso do aluno no mundo do trabalho e a geração de renda. Assim, são ofertados os cursos com 60 horas de carga horária, em turmas de 10 estudantes, totalizando 540 vagas por ano. As ações educativas se basearam na experiência da organização social selecionada e também em Plano de Coordenação Psicopedagógica desenvolvido especificamente para essa meta.

Meta 4. Campanhas Educacionais

Foram realizadas 4 (quatro) campanhas de educação ambiental, promovendo, também, a arrecadação de resíduos eletrônicos nos municípios de maior expressividade populacional do estado: Anápolis, Goiânia, Aparecida de Goiânia e Senador Canedo. A Campanha Educacional é uma ação de conscientização da população para a importância do descarte de lixo eletrônico. Consiste numa série de ações de abordagem direta e sensibilização, e também infraestrutura disponibilizada para garantir a coleta e posterior destinação dos resíduos eletroeletrônicos.

Foram realizadas duas modalidades de campanha: Gincana nas Escolas e Caravana do Descarte. A Gincana nas Escolas é uma ação pedagógica de educação ambiental que aconteceu em dezenas de escolas estaduais, com roteiro previamente definido pela SECTI em parceria com a Secretaria de Estado de Educação (SEDUC).

Durante um período de aproximadamente 30 dias são desenvolvidas, em conjunto com a comunidade escolar, atividades educativas sobre o tema “sustentabilidade e lixo eletrônico”. Os alunos são encorajados a trazer de casa seus equipamentos danificados, quebrados ou em desuso para o descarte na própria escola. Cada tipo de equipamento recebe uma pontuação própria e as 5 escolas que acumularem a maior pontuação serão premiadas com kits contendo equipamentos para a informatização de seus espaços escolares.

Durante o período da campanha foram visitadas as 30 escolas participantes para prestar orientações sobre a campanha, realizar palestra sobre a importância do lixo eletrônico e distribuir cartilha pedagógica. Esta atividade foi acompanhada pelo “Mascote da Campanha”.



Foram oferecidas aos alunos atividades lúdicas, interdisciplinares e adequadas às diferentes faixas etárias, em parceria com a comunidade escolar, estimulando a participação dos educandos, a partir do eixo central: “sustentabilidade e lixo eletrônico”.

Ao término do período de descarte, foram coletados todos os equipamentos descartados e conferida a pontuação de cada escola participante. Foi realizada uma cerimônia de entrega de premiação que aconteceu durante evento específico para promover esta ação.

5. Considerações Finais

O estudo realizou uma avaliação *ex-post*, do programa *Sukatech*, com destaque para alguns elementos da sua implementação e seus resultados. A política pública atende a diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os 4, 6, 8, 9, 11 e 12.

Ao todo, foram reconicionados mais de 700 computadores, capacitados mais de 1000 estudantes e coletadas 264 toneladas de resíduos, das quais mais da metade teve sua destinação adequada, conforme dados do sistema de gestão da entidade que operacionaliza o *Sukatech*.

O modelo circular propõe minimizar os impactos ao meio ambiente ao passo que busca reinserir resíduos no ciclo produtivo e reduzir a extração de matéria prima (FOSTER; ROBERTO; IGARI, 2016; SILVA *et al.*, 2021). Dessa forma, a Economia Circular se opõe ao modelo linear de produção econômica, sendo que uma gestão. Essas ações convergem com os objetivos da ecoeficiência de Thomas e Scott (2015), Dias (2011) e Barbieri (2016), já que promovem a redução de materiais e energia por unidade de produto ou serviço, juntamente com a diminuição dos impactos sobre o meio ambiente.

Assim, o programa promoveu o aumento das taxas de reciclagem e na proteção ambiental, no tocante ao cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Isso vai ao encontro dos objetivos de ecoeficiência apontados por Thomas e Scott (2015), Dias (2011) e Barbieri (2016), os quais buscam tornar as empresas mais competitivas, inovadoras e ambientalmente responsáveis, de forma a incrementar qualitativamente a economia, ao passo que também reduz os impactos ambientais e o consumo de recursos ao longo do ciclo de vida dos produtos e serviços. Nesse sentido, as empresas buscam soluções inovadoras e sustentáveis, baseadas nos princípios da Economia Circular, por exemplo.

Nessa perspectiva, as ações implementadas pelo Programa *Sukatech* objetivaram o prolongamento da vida útil do que será produzido, reprocessamento de subprodutos e reintegração deles na cadeia produtiva visando aumentar o ciclo de vida. Parte-se do pressuposto por meio deste estudo, que os resíduos, na visão da EC, agora nomeadamente de co-produtos, não são mais pejorativos do processo, são reinseridos no ciclo produtivo, proporcionando a minimização dos impactos ao meio ambiente. Tais ações vão de encontro aos estudos de Foster *et al.* (2016), Oliveira *et al.* (2018), Silva *et al.* (2021) e Vier *et al.* (2021).



Assim, os processos produtivos lineares “extrair, transformar e descartar”, os quais dependem de grandes quantidades de materiais e de recursos ambientais, se transformam visando a redução, reutilização e reciclagem num sistema circular. Juntamente à perspectiva da EC, essas estratégias convergem com a gestão ambiental, pois buscam o controle da poluição e dos seus efeitos, prevenção do surgimento, ou do desenvolvimento de estratégias que possibilitem transformar os problemas ambientais em oportunidades de negócios.

Agradecimentos

Agradecemos à Secretaria Ciência, Tecnologia e Inovação do Estado de Goiás (SECTI-GO) por abrirem as portas à pesquisa científica e pelo importante trabalho que se coloca como exemplo a ser seguido por outros governos brasileiros.

Referências

- ASSUNÇÃO, G.M. A gestão ambiental rumo à economia circular: como o Brasil se apresenta nessa discussão. **Sistemas & Gestão**, v. 14, n. 2, p. 223-231, 2019.
- BARBIERI, J. C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. 4 ed. São Paulo: Saraiva, 2016.
- BARDIN, L. **Análise de conteúdo**. Lisboa: Edições 70, 1977.
- BRASIL, LEI Nº 14.479, DE 21 DE DEZEMBRO DE 2022. **Institui a Política Nacional de Desfazimento e Recondicionamento de Equipamentos Eletroeletrônicos e dispõe sobre o Programa Computadores para Inclusão**.
- CONTE, I.I.; BOFF, L.A. As crises mundiais e a produção de alimentos no Brasil. **Acta Scientiarum: Human and Social Sciences**, v.35, n.1, p.49-59, 2013.
- COSENZA, J.P.; ANDRADE, E.M.; ASSUNÇÃO, G.M. Economia circular como alternativa para o crescimento sustentável brasileiro: análise da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 9, n. 1, p. 16147, 2020.
- DIAS, R. **Gestão ambiental: responsabilidade e sustentabilidade**. São Paulo: Atlas, 2011.
- FOSTER, A.; ROBERTO, S.S.; IGARI, A.T. Economia circular e resíduos sólidos: uma revisão sistemática sobre a eficiência ambiental e econômica. In: **Encontro internacional sobre gestão empresarial e meio ambiente (ENGEMA)**, São Paulo, 2016.



GEDAM, Vidyadhar V. et al. Circular economy practices in a developing economy: Barriers to be defeated. **Journal of Cleaner Production**, v. 311, p. 127670, 2021

GOIÁS, LEI Nº 21.983, DE 30 DE MAIO DE 2023. **Institui a Política Estadual TI Verde**

KALMYKOVA, Y.; SADAGOPAN, M.; ROSADO, L. Circular economy–From review of theories and practices to development of implementation tools. **Resources, conservation and recycling**, v. 135, p. 190-201, 2018.

KORHONEN, J. et al. Circular economy as an essentially contested concept. **Journal of Cleaner Production**, v. 175, p. 544-552, 2018.

MORIN, E. **A Via para o futuro da humanidade**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2013. 392p.

MOZZATO, A.R.; GRZYBOVSKI, D. Análise de conteúdo como técnica de análise de dados qualitativos no campo da administração: potencial e desafios. **Revista de NAÇÕES UNIDAS (org.). (2019). Agência da ONU lista “sete segredos” das florestas do mundo BR. 2019.**

OLIVEIRA, F.R.; FRANÇA, S.L.B.; RANGEL, L.A.D. Princípios de economia circular para o desenvolvimento de produtos em arranjos produtivos locais. **Interações (Campo Grande)**, v. 20, p. 1179-1193, 2019.

PINHEIRO, Marco Antonio Paula et al. Circular economy-based new products and company performance: The role of stakeholders and Industry 4.0 technologies. **Business Strategy and the Environment**, v. 31, n. 1, p. 483-499, 2022.

PINTO, L. A. M. et al. Aspectos Ambientais do Abate de Aves: Uma Revisão. **Revista UNINGÁ Review**, v. 22, n. 3, p. 44-50, 2015.

RIBEIRO, H.; JAIME, P.C.; VENTURA, D. Alimentação e sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 31, p. 185-198, 2017.

RODRIGUES, V.D.V. **Gestão e Contabilidade Ambiental: Análise do Patrimônio e da Rentabilidade de uma Agroindústria em Goiás**. 2020, 117 f. Dissertação. (Mestrado em Agronegócio) – Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2020.

SILVA, T.G.E. et al. Economia circular: um panorama do estado da arte das políticas públicas no Brasil. **Revista Produção Online**, v. 21, n. 3, p. 951-972, 2021.

SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 3ª edição revisada e atualizada. Florianópolis, 2001. 121 p.

TISOTT, S. T.; SILVA, I. F. N.; DA SILVA RODRIGUES, R. Produção científica do campo do conhecimento da contabilidade ambiental: um estudo em



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

periódicos nacionais de contabilidade. **RAGC (Revista de Auditoria, Governança e Contabilidade)**, v. 6, n. 23, 2018.

THOMAS, J.M; SCOTT, J.L. **Economia Ambiental**: Fundamentos, políticas e aplicações. Tradução: Antônio Lot; Marta Reyes Gil Passos. São Paulo: Cenagage Learning, 2015.

VIER, M.B. *et al.* Reflexões sobre a Economia Circular. **COLÓQUIO-Revista do Desenvolvimento Regional**, v. 18, n. 4, out/dez, p. 27-47, 2021.



POTENCIAL DE RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DE PCI: UM ESTUDO DE CASO NO MUNICÍPIO DE CARUARU-PE

Ana Paula dos Santos Silva^{1*}; José Francisco de Oliveira Neto²; Maisa Mendonça Silva³; Lourdinha Florencio²; Simone Machado Santos¹

¹ Núcleo de Tecnologia/UFPE; ² Departamento de Engenharia Civil e Ambiental/UFPE;

³ Departamento de Engenharia de Produção/UFPE

*paula.ssilva@ufpe.br

Resumo

A dinâmica do mercado de equipamentos eletroeletrônicos, com demanda crescente e vida útil cada vez mais reduzida, associada ao descarte acelerado desses dispositivos, coloca em evidência os desafios urgentes da gestão sustentável dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Esses resíduos são compostos por plásticos, vidro, cerâmica e metais variados, muito dos quais podem ser reciclados e reutilizados. O componente mais importante dos REEE são as placas de circuito impresso (PCI), uma vez que concentram a maior parte dos metais, inclusive os de maior valor. A estratégia da mineração urbana, surge como uma alternativa viável para minimizar os impactos ambientais causados pela extração convencional dos metais usados em PCIs. Neste artigo, foi estudado o potencial de geração de PCIs em bairros da cidade de Caruaru (PE), através da massa percentual contida nos equipamentos eletroeletrônicos analisados. Com base na geração anual de resíduos eletroeletrônicos, foram estimadas o potencial de recuperação da fração metálica das PCIs. Essas estimativas de metais potencialmente recuperáveis oferecem subsídios valiosos ao poder público na implantação de sistemas de logística reversa. A adoção de práticas, como a instalação de postos de entrega voluntária e coleta seletiva nos bairros que apresentam maior geração de REEE, são exemplos que facilitam a recuperação e reciclagem dos metais, trazendo benefícios tanto econômicos quanto ambientais.

Palavras-chave: REEE; PCI; Potencial; PEV; Coleta.

1. Introdução

O Brasil é o primeiro maior produtor de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) da América do Sul e o segundo das Américas (FORTI et al., 2020). Um fluxo cada vez maior de produção e descarte, faz com que o gerenciamento dos REEE seja um grande desafio nos países em desenvolvimento.

Os REEE são compostos por plásticos, vidro, cerâmica e por metais variados, os quais podem ser reciclados e/ou reutilizados. Um dispositivo fundamental contido nos equipamentos eletroeletrônicos é a placa de circuito impresso (PCI), que representa aproximadamente 6% da sua massa total (DAS et al., 2009). A composição das PCIs



varia muito de acordo com o tipo de equipamento estudado. Uma parcela significativa das PCIs é composta por metais como cobre, estanho, zinco e ferro, a metais valiosos, como ouro, prata e platina, o que mostra que há um potencial de interesse econômico a ser explorado. As PCIs também são compostas por uma parcela de metais pesados como chumbo e mercúrio, por exemplo (RIBEIRO, 2013). Portanto, os REEE que apresentam as PCIs como um componente chave, tornaram-se a categoria de resíduos sólidos perigosos de mais rápido crescimento no mundo (OGUNSEITAN et al., 2022). Diante de tal composição, uma das formas de tratamento para os REEE, especificamente as PCIs, baseia-se no conceito de mineração urbana. A mineração urbana refere-se ao aproveitamento de minerais como matéria-prima para fins econômicos, a partir de fontes secundárias, minimizando os impactos ambientais causados pela mineração convencional, obtida de matérias-primas não renováveis (XAVIER e LINS, 2018). Os materiais obtidos dessa forma têm o mesmo nível de qualidade daqueles obtidos das jazidas naturais (GREENELETRON, 2019).

Nesse sentido, o Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, subsidia o cumprimento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), no que diz respeito ao estabelecimento de diretrizes para a implantação de sistemas de logística reversa para produtos eletroeletrônicos domésticos e seus componentes (BRASIL, 2020). Adicionalmente, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares) (BRASIL, 2022), instituído pelo do Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022, prevê o aumento da recuperação de resíduos, em um horizonte de 20 anos.

Em Caruaru, diariamente são coletadas 300 toneladas de resíduos sólidos, o que representa uma geração per capita de 0,84 kg/habitante/dia (CARUARU, 2017b). Entretanto, segundo o “Plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos do município de Caruaru” (CARUARU, 2023), os resíduos sólidos sujeitos a logística reversa, incluindo os produtos eletroeletrônicos e seus componentes são coletados com o lixo doméstico.

O poder público, a população e os interessados do setor de equipamentos eletroeletrônicos devem estar preparados para participar, efetivamente, do sistema de logística reversa, em um futuro próximo. Neste sentido, esse trabalho tem como objetivo contribuir para a gestão dos REEE, por meio de um estudo de caso, onde se estimou o potencial de recuperação dos metais componentes das PCI dos REEE do município de Caruaru (Pernambuco).

2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo estimar o potencial de recuperação de metais em PCIs dos seguintes equipamentos eletroeletrônicos, descartados como resíduos no município de Caruaru: notebooks, telefones celulares, tablets, TVs LCD, TVs LED, TVs CRT, computadores de mesa e impressoras.

Como objetivos específicos, tem-se:

- Determinar a geração de REEE anual no município de Caruaru-PE;
- Identificar os bairros que apresentam maior geração de REEE;
- Determinar o potencial de metais recuperáveis nas PCI (em kg).

3. Materiais e métodos

3.1 Área de estudo

Como área de estudo, foi escolhida a cidade de Caruaru, em Pernambuco (Figura 1). O município tem uma área de 920,6 km², com uma população estimada de 356.872 habitantes, além de possuir 200.394 domicílios (urbanos e rurais) (CARUARU, 2017a). Para o presente estudo foi considerada apenas a área urbana do município, a qual conta com cerca de 184.641 domicílios.

O atual cenário demonstra uma constante evolução econômica no município, principalmente, em função da instalação de empresas de serviços que trazem investimentos para a região e que, conseqüentemente, promovem a geração de empregos.

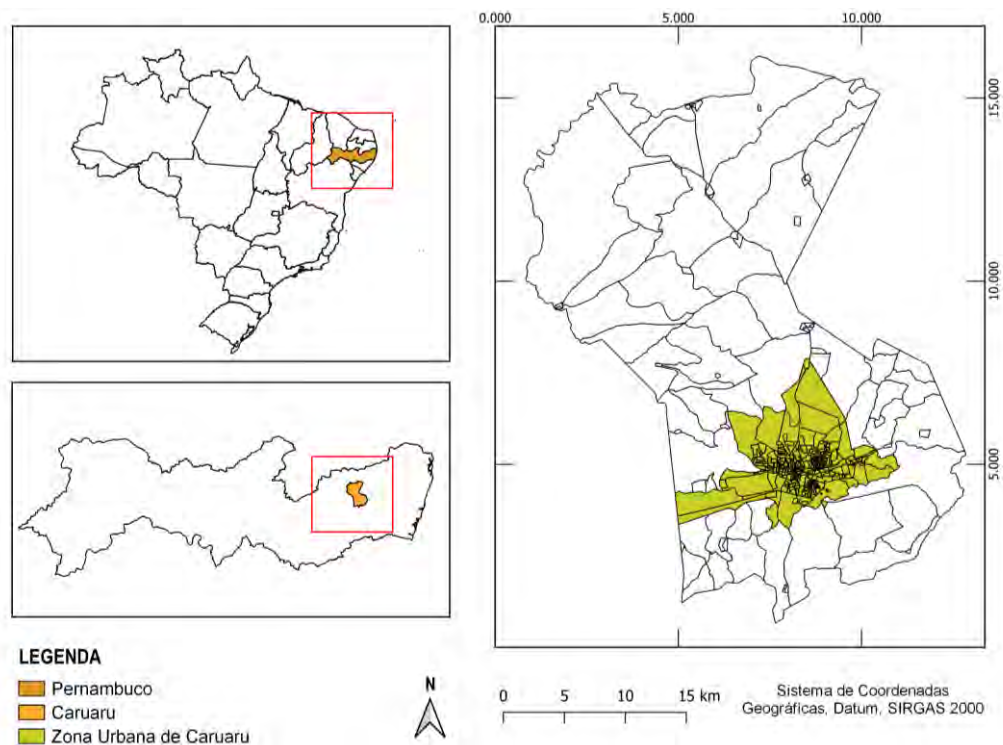


Figura 1 – Localização da área de estudo (município de Caruaru)

Fonte: AUTOR, 2023

3.2 Dados de geração de REEE

Os dados de geração de REEE utilizados neste estudo foram coletados dos trabalhos de Oliveira Neto (2019) e de Silva (2023). Nos trabalhos, foi aplicado o Método de Aproximação Robinson, que leva em consideração o estoque de equipamentos, o peso médio de cada equipamento e sua vida útil, para estimar o potencial de geração dos REEE para dois bairros de classe média-alta da cidade. Neste estudo, foram considerados os seguintes equipamentos eletroeletrônicos (EEE): computador de mesa, notebook, impressora, tablet, telefone celular, TV CRT, TV



LCD/plasma e TV LED. Como resultado, foi estimada uma geração domiciliar de REEE para o município de Caruaru de $13,10 \text{ kg.domicílio}^{-1}.\text{ano}^{-1}$.

Portanto, a partir do número de domicílios por bairro de Caruaru (disponível em Caruaru (2017a)), estimou-se a geração de REEE e PCI por bairros.

3.3 Placas de circuito impresso

Um dos componentes de maior interesse dos REEE são as Placas de Circuito Impresso (PCI). A PCI é a base em que se interligam os resistores, capacitores, indutores, diodos, transistores, dentre outros componentes (RADISPIEL, 2013). Elas representam uma média de 6% da massa total do equipamento (DAS et al., 2009).

O principal componente das PCI são os metais, constituindo uma parcela de 40% da sua massa, seguido pelos polímeros e cerâmicas, com 30% cada (MEDEIROS, 2015). Dentre os metais, os principais são ferro, cobre, alumínio, platina, paládio, ouro, prata, além de uma fração de metais tóxicos como zinco, chumbo e mercúrio. No entanto, como não são homogêneas, a composição varia de acordo com o tipo de EEE (MEDEIROS, 2015; CALDAS et al, 2018). Na Tabela 1, é apresentada a porcentagem de PCI nos EEE (de acordo com Babbitt et al. (2017)) e a porcentagem (em massa) de alguns metais presentes nas PCI (segundo Cuchiella et al. (2016)) dos EEE considerados neste estudo.

Composição (% em massa)	Computador de mesa		Notebook	Impressora	Tablet	Telefone celular	TV CRT	TV LCD/ Plasma	TV LED
	Monitor	CPU							
PCI	12	14	15	3	10	10	10	7	2
Ferro	3,400	1,300	3,700	14,100	3,700	1,800	3,400	6,930	6,930
Cobre	7,200	20,000	19,000	20,000	19,000	33,000	7,200	17,250	17,250
Prata	0,080	0,100	0,100	0,170	0,100	0,400	0,080	0,080	0,080
Ouro	0,010	-	0,100	0,040	0,100	0,200	0,010	0,010	0,010
Paládio	0,002	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,002	0,002	0,002
Alumínio	6,200	1,800	1,800	3,380	1,800	1,500	6,200	10,050	10,050
Berílio	-	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	-	-	-
Bismuto	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,030	0,030
Cromo	0,020	-	0,100	0,540	0,100	0,100	0,020	0,020	0,020
Estanho	0,180	8,300	1,600	0,690	1,600	3,500	0,180	0,730	0,730
Zinco	5,300	1,700	1,600	1,350	1,600	0,500	5,300	1,170	1,170
Antimônio	0,160	0,300	0,100	0,130	0,100	0,100	0,160	0,160	0,160
Bromo	0,390	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,390	0,390	0,390
Cloro	0,310	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,310	0,310	0,310
Chumbo	1,400	2,100	1,000	0,790	1,000	1,300	1,400	1,090	1,090
Níquel	0,260	1,130	1,130	1,130	1,130	1,130	0,260	0,260	0,260

Tabela 1 – Porcentagens em massa: PCI por EEE e fração metálica das PCI

Fonte: Adaptado de Cuchiella et al. (2016) e Babbitt et al. (2017)

A geração de PCI foi estimada a partir da porcentagem (em massa) dessa componente nos EEE analisados neste estudo (conforme Tabela 1). Com base na



geração anual de REEE, foi estimado o potencial de recuperação da fração metálica das PCI na geração anual de REEE da cidade de Caruaru.

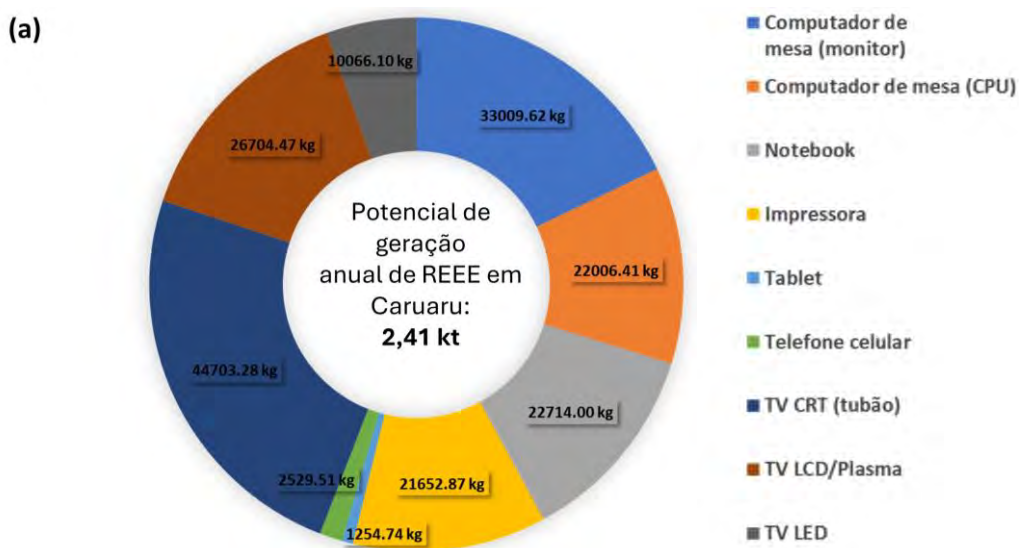
4. Resultados e discussão

4.1 Geração de REEE em Caruaru

Na Figura 2, é apresentado o panorama de geração dos REEE na cidade de Caruaru. A geração total estimada para o município foi de 2,41 quilotoneladas de REEE (Figura 2a). As TVs e monitores são os EEE com maior participação na massa de REEE, com destaque para: Tv CRT, monitor de PC e Tv LCD (Figura 2a). Isso se deve ao peso desses equipamentos, variável considerada no método de estimativa, adotado por Oliveira Neto (2019). Em estudos realizados nas cidades de São Paulo (RODRIGUES et al., 2015) e em Belo Horizonte (FRANCO & LANGE, 2011), os autores também de destacaram a participação dos monitores CRT e televisores na massa de REEE estimadas. Vale destacar que o televisor, assim como o telefone celular, é um EEE comum nos domicílios brasileiros, independentemente, do nível de renda familiar.

Com relação a geração de REEE por bairros (Figura 2b), destacam-se os bairros do Salgado, Boa Vista, Kennedy e Maurício de Nassau. Esse é um importante resultado para os responsáveis pela gestão ambiental do município, o que pode dar suporte ao gerenciamento adequado dos REEE gerados na cidade. Como os bairros Salgado e Maurício de Nassau, assim como Kennedy e Boa Vista, são bairros vizinhos, isso pode facilitar a implantação e operação de pontos de entrega voluntária (PEV) de REEE.

Os resultados da Figura 2b podem auxiliar na otimização de implantação de PEV e de rotas de coleta. Nesse sentido, os estudos de Ottoni et al. (2020) e Araújo et al. (2020) avaliaram a distribuição de PEVs nos municípios do Rio de Janeiro e de São Paulo, respectivamente. Em estudo realizado no município de Caruaru, Oliveira Neto et al. (2022) apontam a localização dos pontos de coleta de REEE como um fator preponderante para a participação dos consumidores em programas de coleta seletiva.



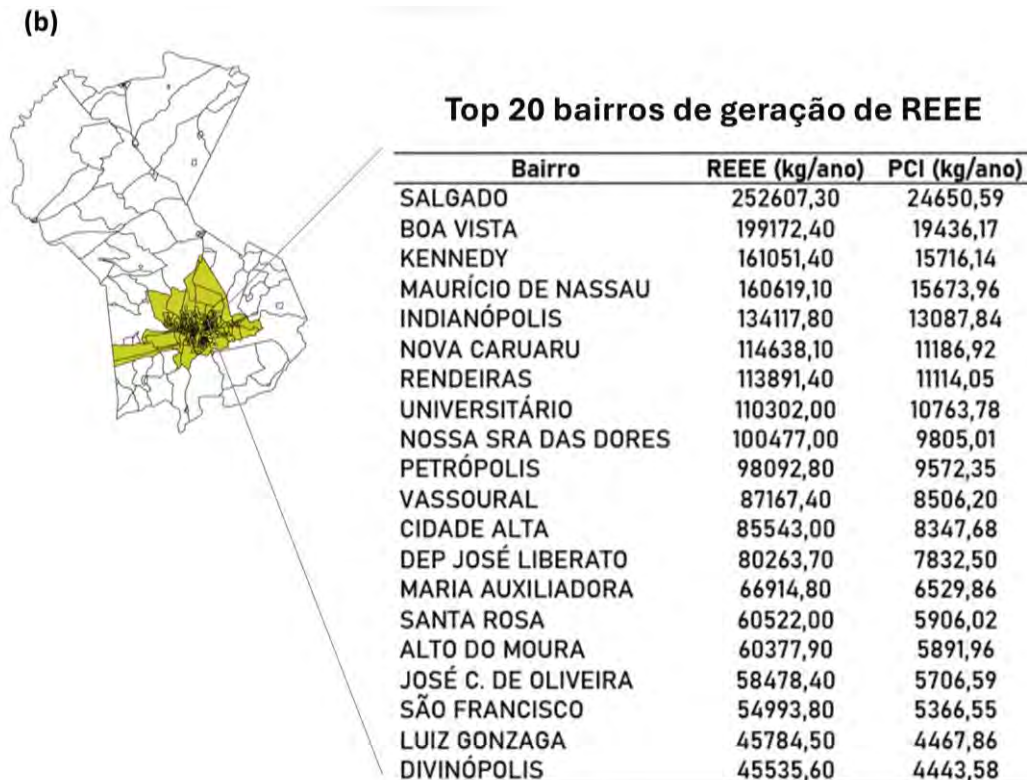


Figura 2 – Geração de REEE/PCI em Caruaru: (a) por tipo de EEE e (b) por bairros
Fonte: AUTOR, 2023

4.2 Geração de PCI e potencial de metais recuperáveis

Na Figura 3, é apresentada a geração de PCI e seu potencial de metais disponíveis para recuperação. A geração anual estimada para as PCI foi de aproximadamente 258 toneladas (conforme Figura 3a). A quantidade de PCI foi traduzida na forma de recursos secundários disponíveis para recuperação da fração metálica. A Figura 3b mostra a quantidade de recursos disponíveis para recuperação de metais básicos (com destaque para cobre, alumínio, ferro e zinco), metais preciosos (prata, ouro, paládio) e metais críticos (antimônio e níquel).

A presença de metais valiosos e críticos nos REEE tornam a sua a reciclagem uma atividade de grande interesse econômico (Cesaro et al., 2018). Com isso, os estudos desenvolvidos no país têm dado ênfase na recuperação das frações metálica (Kasper et al., 2011; Rubin et al., 2014; Silva et al., 2018; Martins et al., 2021; Cenci et al., 2022).

Por outro lado, a presença de materiais perigosos (incluindo metais pesados e plásticos) causa grande preocupação e impõe a necessidade de uma gestão sustentável para os REEE. Na Figura 3b, destacam-se alguns metais potencialmente perigosos, incluindo chumbo, bromo, cromo.

Nesse sentido, a mineração urbana de REEE/PCI é uma estratégia que pode promover benefícios ambientais e econômicos, além de estimular a circularidade na cadeia de suprimentos (Ongondo et al., 2015; Tesfaye et al., 2017; Xavier et al., 2019).

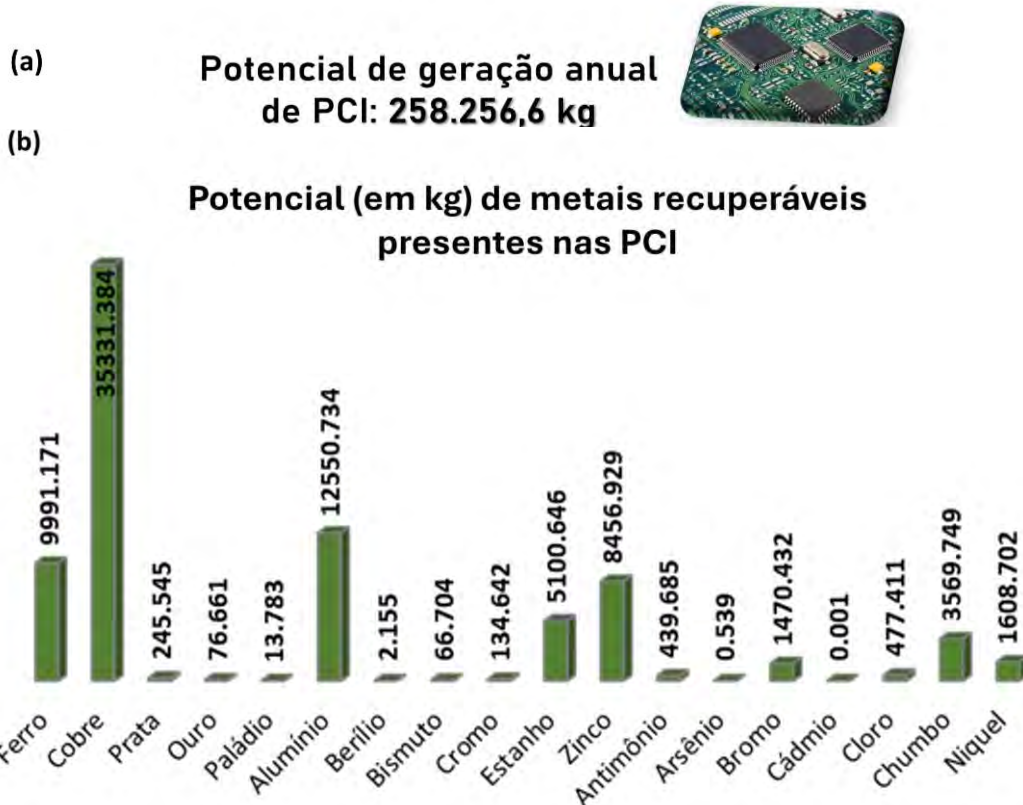


Figura 3 – Geração de PCI em Caruaru: (a) potencial anual e (b) quantidade de metais recuperáveis
Fonte: AUTOR, 2023

5. Considerações Finais

O presente estudo determinou o potencial de metais recuperáveis, através da reciclagem de PCI, nos REEE gerados no município de Caruaru-PE. O estudo revelou a importância de se implementar políticas e programas eficazes de gerenciamento para esse tipo de resíduo. O consumo elevado de equipamentos eletroeletrônicos gerou, nos últimos anos, um aumento na quantidade de resíduos de PCIs. Como muitos metais estão presentes nas PCIs, sobretudo os preciosos, a reciclagem e recuperação desses materiais são imprescindíveis para a sustentabilidade ambiental e do setor produtivo, visto que muitos deles são considerados matérias-primas críticas.

A crescente geração de REEE apresenta desafios ambientais e de saúde pública, mas também oferece oportunidades significativas para a economia local, através da recuperação de materiais valiosos (com destaque para a fração metálica) e da promoção da indústria de reciclagem de alta tecnologia. Nesse sentido, é necessário que autoridades municipais, empresas e comunidade trabalhem em conjunto para estabelecer um sistema de logística reversa eficiente, visando não apenas minimizar o impacto ambiental, mas também impulsionar o crescimento sustentável e a criação de empregos.

Apesar das limitações relacionadas ao uso de dados secundários e à localização geográfica (município de Caruaru-PE), os resultados obtidos neste estudo fornecem insights valiosos sobre a geração de REEE/PCI e o potencial de recuperação dos materiais presentes nesse fluxo de resíduos sólidos. Além disso, o estudo ainda serve



como um ponto de partida para investigações mais abrangentes e detalhadas, que podem considerar dados primários e incluir outras áreas de estudo. Por fim, os resultados aqui apresentados levam a uma compreensão inicial do problema, para posterior identificação de soluções eficazes de gerenciamento de REEE.

Referências

ARAUJO, R.; CUGULA, J.; APOLONIO, L.; GOMES, C. F. M. S.; OTTONI, M.; XAVIER, L. H. **Alocação de pontos de entrega voluntária de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na cidade de São Paulo por meio de análise multicritério em SIG**. 11º Fórum internacional de Resíduos Sólidos. Porto Alegre/RS, 2020.

BABBITT, C.; ALTHAF, S.; CHEN, R. **Sustainable materials management for the evolving consumer technology ecosystem**. Summary report of phase 1, 2017.

BRASIL. **Decreto 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. Diário Oficial da União, 12 de fev. de 2020.

BRASIL. **Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022**. Aprova o Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, 13 de abr. de 2022.

BRASIL. **Lei No. 12.305, 02 de agosto de 2010**. Estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Altera a Lei No. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras Providências. Diário Oficial da União, 02 de ago. De 2010.

CALDAS, M; LOUREIRO, B; SILVAS, F; MORAES, V; TENÁRIO, J; ESPINOSA, D. **Placas de circuito impresso: caracterização e valor agregado**. Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 16, n. 2, p. 203-211, 2019.

CARUARU. **Relatório quantitativo de imóveis por bairro**. Prefeitura Municipal de Caruaru, Secretaria da Fazenda, 2017.

CARUARU. **Revisão do plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos do município de Caruaru**. Prefeitura Municipal de Caruaru. Equipe Técnica de Projetos Ambientais, 2017.

CARUARU. **Plano de saneamento básico setorial para a limpeza urbana e o manejo dos resíduos sólidos do município de Caruaru - versão preliminar**. Prefeitura Municipal de Caruaru, 2023.

CENCI, M.P.; DAL BERTO, F.C.; CASTILLO, B.W.; VEIT, H.M. **Precious and critical metals from wasted LED lamps: characterization and evaluation**. Environ. Technol. 43, 1870–1881, 2022.

CESARO, A.; MARRA, A.; KUCHTA, K.; BELGIORNO, V.; VAN HULLEBUSCH, E.D. **WEEE management in a circular economy perspective: An overview**. Glob. Nest J. 20, 743–750, 2018.



CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, L.; ROSA, P. **A profitability assessment of European recycling processes treating printed circuit boards from waste electrical and electronic equipments**. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 64, 749–760, 2016.

DAS, A.; VIDYADHAR, A.; MEHROTRA, S. P. **A novel flowsheet for the recovery of metal values from waste printed circuit boards**. *Resources, Conservation and Recycling*, 53, 464–469, 2009.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential**. 2020. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf>. Acesso em: 03 de ago. 2023.

FRANCO, R. G. F.; LANGE, L. C. **Estimativa fluxo REEE em BH**. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 16, n. 1, p. 73–82, 2011.

GREENELETRON. **O que é a mineração urbana?**. 2019. Disponível em: <<https://greeneletron.org.br/blog/o-que-e-a-mineracao-urbana/>>. Acesso em: 05 de jul. 2023.

IBGE. **Portal cidades Caruaru**. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/caruaru/panorama>>. Acesso em: 25 jul. 2023.

KASPER, A.C.; BERSELLI, G.B.T.; FREITAS, B.D.; TENÓRIO, J.A.S.; BERNARDES, A.M.; VEIT, H.M. **Printed wiring boards for mobile phones: Characterization and recycling of copper**. *Waste Manag.* 31, 2536–2545, 2011.

MARTINS, T.A.G.; FALCONI, I.B.A.; PAVOSKI, G.; DE MORAES, V.T.; GALLUZZI BALTAZAR, M. DOS P.; ESPINOSA, D.C.R. **Green synthesis, characterization, and application of copper nanoparticles obtained from printed circuit boards to degrade mining surfactant by Fenton process**. *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 106576, 2021.

MEDEIROS, N. M. **Caracterização e separação física de placas de circuito impresso de computadores obsoletos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

OGUNSEITAN, O. A.; SCHOENUNG, J. M.; LINCOLN, J.; NGUYEN, B. H.; STRAUSS, K.; FROST, K.; SCHWARTZ, E.; HE H.; IBRAHIM, M. **Biobased materials for sustainable printed circuit boards**. *Nature Reviews | Materials* 7, 749–750, 2022.

OLIVEIRA-NETO, José Francisco. **Caracterização dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos Produzidos em Bairros de Classe Média-alta de Caruaru/PE**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, UFPE-CAA. Caruaru, 2019.

OLIVEIRA NETO, J.F.; MONTEIRO, M.; SILVA, M.M.; MIRANDA, R.; SANTOS, S.M. **Household practices regarding e-waste management: A case study from Brazil**. *Environ. Technol. Innov.* 28, 102723, 2022.



ONGONDO, F.O.O.; WILLIAMS, I.D.D.; WHITLOCK, G. **Distinct Urban Mines: Exploiting secondary resources in unique anthropogenic spaces.** *Waste Manag.* 45, 4–9, 2015.

OTTONI, M.; ARAUJO, R.; XAVIER, L. H. **Quantificação de pontos de entrega voluntária (PEVS) de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) na cidade do Rio de Janeiro.** 11º Fórum internacional de Resíduos Sólidos. Porto Alegre/RS, 2020.

RADISPIEL, F. H. **Avaliação de compósitos cimentícios com adição de fibras curtas originadas de placas de circuito impresso.** Universidade Federal de Ouro Preto. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Materiais). Minas Gerais, 2013.

RIBEIRO, P. P. M. **Concentração de metais contidos em placas de circuito impresso de computadores descartados.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Metalúrgica da Escola Politécnica). Rio de Janeiro, 2013.

RODRIGUES, A. C.; GUNTHER, W. M. R.; BOSCOV, M. E. G. **Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil.** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 3, p. 437–447, 2015.

RUBIN, R.S.; CASTRO, M.A.S. DE; BRANDÃO, D.; SCHALCH, V.; OMETTO, A.R. **Utilization of Life Cycle Assessment methodology to compare two strategies for recovery of copper from printed circuit board scrap.** *J. Clean. Prod.* 64, 297–305, 2014.

SILVA, A. P. S. **Mineração urbana a partir de placas de circuito impresso de resíduos eletroeletrônicos: um estudo de caso na cidade de Caruaru-PE: um estudo de caso na cidade de Caruaru-PE.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2023.

SILVA, W.C.; DE SOUZA CORRÊA, R.; DA SILVA, C.S.M.; AFONSO, J.C.; DA SILVA, R.S.; VIANNA, C.A.; MANTOVANO, J.L. **Recovery of base metals, silicon and fluoride ions from mobile phone printed circuit boards after leaching with hydrogen fluoride and hydrogen peroxide mixtures.** *Waste Manag.* 78, 781–788, 2018.

TESFAYE, F.; LINDBERG, D.; HAMUYUNI, J.; TASKINEN, P.; HUPA, L. **Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste.** *Miner. Eng.* 111, 209–221, 2017.

XAVIER, L.H.; GIESE, E.C.; RIBEIRO-DUTHIE, A.C.; LINS, F.A.F. **Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining.** *Resour. Policy.* 74, 101467, 2019.

XAVIER, L. H.; LINS, F. **Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil.** *Brasil Mineral*, No. 379, 2018.



PROCESSAMENTO MECÂNICO E LIXIVIANTE QUÍMICOS NA RECUPERAÇÃO DE ELEMENTOS VALIOSOS DE BATERIAS DE LÍTIO

Deyber Alexander Ramirez Quintero*; Marcos Batista Cotovia Pimentel; Carlos Roberto Mendes de Oliveira; Sebastiao Eleuterio Filho
Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer - CTI
*deyber.quintero@cti.gov.br

Resumo

A implementação do Sistema de Logística Reversa (SLR) no Brasil para a coleta dos resíduos eletrônicos gerados pós-consumo apresenta diversos desafios tecnológicos e ambientais. Alinhar a gestão dos resíduos eletrônicos à proteção do meio ambiente requer a incorporação de novos agentes químicos nas rotas tecnológicas que proporcionem o desenvolvimento econômico com o devido compromisso ambiental. Os grandes volumes de baterias de lítio descartadas no país demandam a necessidade de desenvolver o uso de lixiviantes que, além de gerar altas eficiências na recuperação dos seus elementos valiosos, devem ser ambientalmente amigáveis. Este trabalho apresenta um processamento físico, sem utilizar o tratamento térmico, e uma comparação entre os lixiviantes inorgânicos e orgânicos usados nos processos de recuperação dos elementos valiosos de baterias de lítio, visando elaborar uma base para o desenvolvimento de uma rota tecnológica para a recuperação dos elementos valiosos dos resíduos eletroeletrônicos, que possa ser oferecida e implantada no setor empresarial e industrial do país.

Palavras-chave: Sistema de Logística Reversa; Resíduos eletroeletrônicos; Lixiviação; Baterias de lítio.

1. Introdução

A grande demanda que nos últimos anos está tendo o uso das baterias de lítio (BL) no mundo, devido à sua alta densidade de energia, baixo custo de manutenção e flexibilidade (NATKUNARAJAH *et al.*, 2015; ZHAO *et al.*, 2019), disparou o alerta quanto à geração de grandes quantidades de resíduos eletroeletrônicos (e-waste) (DU *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2014). O descarte incorreto destes resíduos pode causar danos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana devido aos elementos tóxicos nele contidos (MCMANUS, 2012; MESHARAM *et al.*, 2020; ORDOÑEZ *et al.*, 2016). Por outro lado, o descarte adequado dos resíduos eletroeletrônicos e o seu processamento viabiliza a possibilidade de incentivar a economia circular e impulsionar o desenvolvimento social e econômico, resultado da recuperação dos elementos valiosos que esses resíduos contém (AWASTHI *et al.*, 2019; SAVINI, 2021). Segundo as estimativas da

Universidade das Nações Unidas (FORTI *et al.*, 2020), o Brasil é o 2º país que mais gera resíduo eletrônico nas Américas e o 5º no mundo. De acordo com esse estudo, dos 53,6 milhões de toneladas de resíduo eletrônico gerado em todo o mundo, o Brasil é responsável por 2,1 milhões de toneladas deste material. Segundo as tendências globais do mercado de baterias de lítio (View, 2022), este mercado atingiu US\$ 48,2 bilhões até 2022 e projeta-se uma taxa composta de crescimento anual de 18,1% até 2030.

As baterias recarregáveis são amplamente utilizadas, mundialmente, nos aparelhos móveis e em parte da frota veicular (MARTINS *et al.*, 2021; NARINS, 2017). Atualmente, a melhor aposta, nesses mercados, para o uso das baterias recarregáveis são as baterias de lítio devido ao fato de serem relativamente compactas e estáveis quimicamente; são mais leves e têm maior densidade de energia, longa vida útil e menor auto-descarga, se comparadas com as baterias de outros materiais (Su, 2022; TURCHENIUK *et al.*, 2018). Há estimativas de que em 2022 no Brasil, 424 milhões de dispositivos digitais - computadores, notebooks, tablets e smartphones -, utilizando BL, foram comercializados no país (FGV, 2020). Como mostrado na Figura 1, as BL compostas por camadas intercaladas. Os materiais das baterias de lítio contém substâncias potencialmente tóxicas e nocivas, incluindo (i) metais (como cobre, níquel e chumbo) (XU *et al.*, 2008), (ii) eletrólitos (como LiPF_6 , LiAsF_6 , LiCF_3SO_3 , HF e P_2O_5) e (iii) solventes (como DME, metanol e ácido fórmico) (LI *et al.*, 2016). A Tabela 1 apresenta o percentual em massa dos componentes das baterias de lítio estudadas.

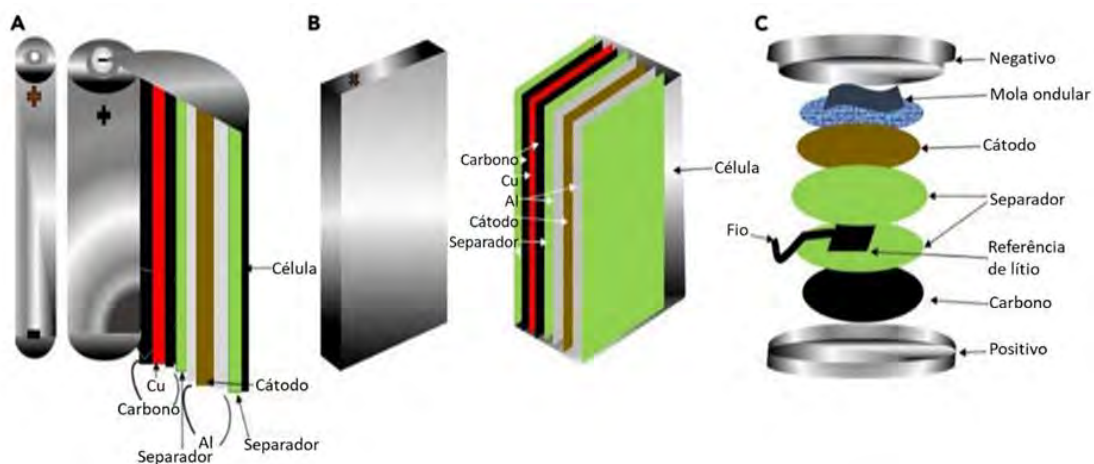


Figura 1 – Esquema da forma e os componentes de várias configurações das baterias de lítio: A, cilíndrica; B, prismática; C, moeda

Fonte: Makwarimba *et al.*, 2022.

Os resultados apresentados por McManus (2012), a respeito dos impactos ambientais na produção das BL mostraram que para a obtenção dos materiais necessários para sua produção, gera-se uma contribuição significativa de gases de efeito estufa. Ordoñez *et al.* (2016) relataram que a cada 4000 t de BL descartadas, são gerados cerca de 1100 t de metais pesados e 200 t de eletrólitos tóxicos. A partir desses estudos anteriormente citados, Meshram *et al.* (2020) descreveram os riscos ocupacionais provocados por cada um dos componentes das BL durante seu descarte e reciclagem, esses dados são mostrados na Tabela 1.



Componente estrutural	Composição Química	Efeitos Perigosos
Ânodo	Cobre (folha metálica)	Problemas gastrointestinais
	Grafite	Irrita os olhos e as membranas mucosas
Óxido catódico	Alumínio (folha metálica)	Dano pulmonar
	Óxido de cobalto	Efeitos respiratórios, congestão, edema e hemorragia pulmonar
	Óxido de manganês (VI)	Dano pulmonar
	Óxido de níquel	Carcinogênese da pele
	Lítio	Não perigoso se ingerido
Eletrólito	LiPF ₆	Fumaça tóxica durante o aquecimento / queima
Binders (ligantes)	Polipropileno	Vapores quando queimado (irritação de mucosas)
	Fluoreto de polivinilideno	Tóxico quando inalado; Fumaça tóxica durante o aquecimento / queima

Tabela 1 – Efeitos dos materiais presentes nas baterias de lítio

Fonte: Adaptado de MESHRAM *et al.*, 2020.

Este trabalho apresenta uma abordagem do processamento físico a través de etapas mecânicas e os ácidos usados na lixiviação para a recuperação dos elementos valiosos das baterias de lítio, visando elaborar uma base para desenvolver uma rota tecnológica para a recuperação dos elementos valiosos das baterias de lítio, que possa ser oferecida e implantada no setor empresarial e industrial do país. Este trabalho está sendo desenvolvido dentro das ações do Programa AMBIENTRONIC⁺¹⁰, cooperação entre o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI), coordenado pelo DIPAQ/CTI, que desde de 2008 desenvolve tecnologias voltadas a sustentabilidade dos produtos eletroeletrônicos, de modo a diminuir o impacto ao meio ambiente e a saúde pública, incentivar a economia circular e promover o desenvolvimento socioeconômico.

2. Processamento das baterias de lítio

Ao longo dos últimos 20 anos, foram propostos vários métodos para a extração dos elementos valiosos das BL (MESHRAM *et al.*, 2020), conforme mostrado na Figura 2. Antes do processamento mecânico das BL é fundamental que as mesmas sejam descarregadas. Explosões, incêndios e emissão de gases tóxicos são fatos comuns que podem acontecer quando ocorrem curtos-circuitos ou contato dos elementos das BL, que podem, conseqüentemente, ser perigosos para a saúde humana e o meio ambiente (ZHANG *et al.*, 2021); bem como aos equipamentos usados no processamento, assim mesmo, afetando negativamente a obtenção dos metais de interesse que se pretendem recuperar das BL (SHAW-STEWART *et al.*, 2019). Isto destaca o risco que a energia armazenada das BL podem representar se não são descarregadas antes do seu processamento.

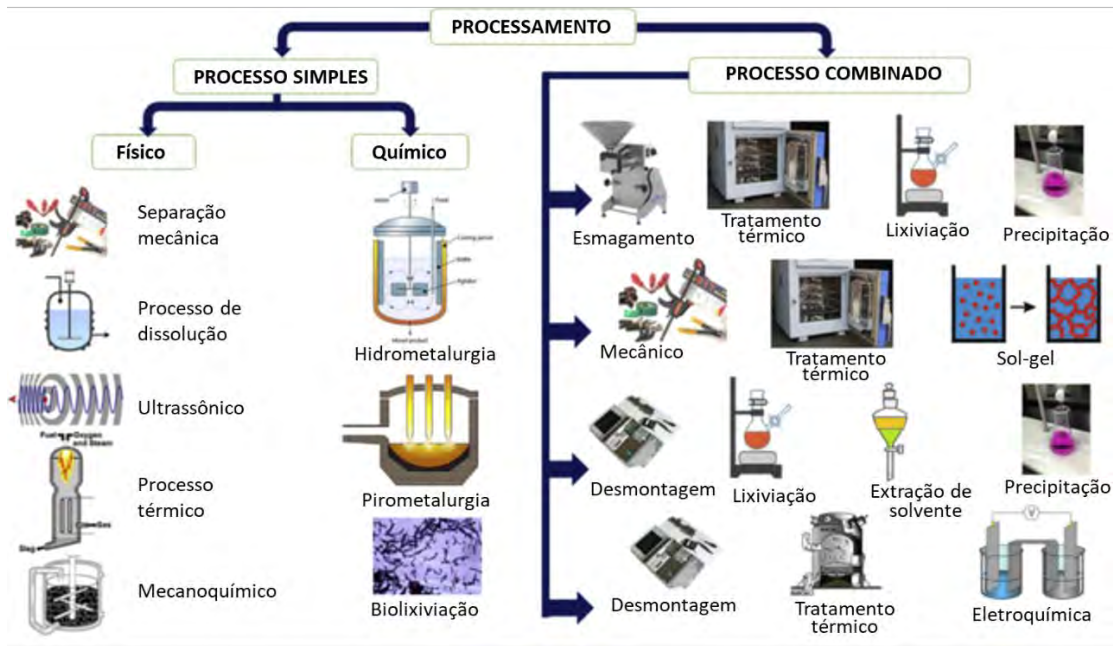


Figura 2 – Diferentes processos físico-químicos para a reciclagem de baterias de lítio
Fonte: Adaptado de MESHRAM *et al.*, 2020.

A Figura 3 apresenta um esquema do fluxo do processo para a reciclagem e descarte seguro das BL e na separação de seus materiais constituintes, com a intenção de reutilizá-los ou reciclá-los, incluindo-os novamente na cadeia produtiva. As BL podem ser desmontadas manualmente e divididas em componentes, tais como: invólucros de plásticos ou metálicos, polímeros, PVC, folha de ânodos e folha de cátodos. Porém, usar uma desmontagem manual em um processamento industrial, envolvendo grandes volumes de baterias, precisaria de uma equipe dedicada apenas para esta fase inicial, o que aumentaria os custos e o tempo do processo, impactando na viabilidade de todo o processo. O processamento físico visa (i) expor os metais que se encontram encapsulados, (ii) eliminar a fração não-metálica (concentrando os metais de interesse) e (iii) pré-separar os metais com valor agregado significativo daqueles de pouco valor no mercado de reciclados (MARSHALL *et al.*, 2020; SOMMERVILLE *et al.*, 2020). Assim, a primeira etapa da rota para o processamento físico das BL é realizá-la através de operações físicas de trituração e moagem. Posteriormente, os componentes são separados por meio de técnicas que exploram diferenças na condutividade elétrica, densidade ou outras propriedades. Os métodos físicos eficazes reduzem o custo do tratamento químico subsequente. Alguns dos desafios atuais estão na dificuldade em controlar as impurezas nos produtos recuperados e na garantia de que todo o processo de reciclagem seja mais sustentável (MAKWARIMBA *et al.*, 2022).

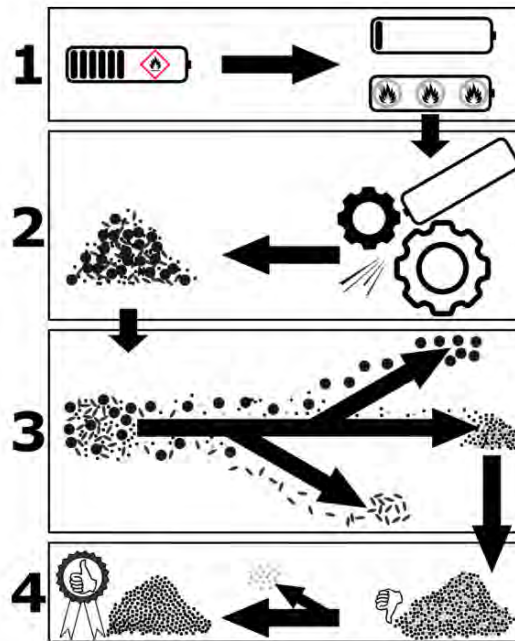


Figura 3 – Diagrama esquemático do fluxo do processo para reciclagem e descarte das baterias de lítio:
1. Descarga elétrica das baterias, 2. Cominuição, 3. Separação física, 4. Purificação

Fonte: SOMMERVILLE *et al.*, 2020.

Depois da separação física dos materiais dos eletrodos, emprega-se o chamado processo de lixiviação. Neste processo, o produto dos processamento mecânico é tratado quimicamente dando origem a uma solução química que contém os metais de interesse. Silva *et al.* (2018) utilizaram BL usadas em telefones celulares de três fabricantes distintos, produzidos entre 2010 e 2014, para investigar a eficiência de diferentes ácidos no processo da lixiviação. Os autores encontraram que a massa eletroativa (anodo, catodo e eletrólito) corresponde a 40% da massa total da bateria; a presença de cobalto e lítio na massa eletroativa é de 40% e 12%, respectivamente, como sendo os metais mais abundantes. Outros elementos que os autores identificaram em pequenas quantidades foram alumínio, cobre (ambos decorrentes da esfoliação das lâminas), cálcio, níquel e fósforo; este último sugere que o eletrólito é de hexafluorofosfato de lítio (LiPF₆). A Tabela 2 apresenta o percentual em massa dos componentes das baterias de lítio.

Componentes	Percentuais (m/m)
Catodo + anodo + eletrólito*	40,0%
Carcaça plástica externa	23,0%
Blindagem de aço	10,5%
Solvente não aquoso	4,5%
Lâmina de cobre	8,2%
Lâmina de alumínio	6,1%
Separador polimérico	5,1%
Contatos elétricos	2,6%

*O carbono corresponde a 30-32% m/m destes componentes (12-13% m/m da amostra total)

Tabela 2 – Composição média das baterias de lítio de três fabricantes distintos

Fonte: SILVA *et al.*, 2018.



3. Ácidos na lixiviação

Vários métodos foram propostos para a extração dos elementos valiosos das BL, estes podem ser categorizados em pirometalurgia (PAULINO *et al.*, 2008), hidrometalurgia (MESHRAM *et al.*, 2014) e bio-hidrometalurgia (MOAZZAM *et al.*, 2021). Entre todas as abordagens de reciclagem disponíveis, o método hidrometalúrgico é o dominante dado ao fato de ser simples e proporcionar altas taxas de recuperação de materiais; uma vez que pode ser repetido através de operações cíclicas de purificação (MESHRAM *et al.*, 2020). Segundo Meshram *et al.* (2020), o biotratamento também chamou a atenção devido à recuperação seletiva e verde de alguns metais das baterias de íon-lítio.

Na técnica hidrometalúrgica, vários processos são realizados para dissolver e extrair metais de um meio aquoso; ou seja, lixiviação ácida (MESHRAM *et al.*, 2015; PAULINO *et al.*, 2008), precipitação química (GUZOLU *et al.*, 2016; SUN *et al.*, 2017), extração de solvente (PAULINO *et al.*, 2008; SUN *et al.*, 2017), e separação eletroquímica. A primeira etapa básica é a dissolução dos metais de interesse (Co, Li, Ni e Mn) por lixiviação ácida e, em seguida, esses metais são extraídos da solução (líquido de lixiviação) por métodos seletivos. Há muitas vantagens em usar tratamentos hidrometalúrgicos para extrair metais valiosos da solução, pois são mais flexíveis e confiáveis, poluem menos que os processos pirometalúrgicos convencionais, o consumo de energia é menor, há boa taxa de reação química, alta pureza dos metais obtidos e pode-se extrair todos os metais presentes nas BL (GARCIA *et al.*, 2008; SUN & QIU, 2012; SUN *et al.*, 2017).

Os lixiviantes usados na literatura podem ser classificados principalmente como ácidos inorgânicos e orgânicos como mostrados na Tabela 3. O uso de ácidos inorgânicos pode levar ao alto consumo de água e de produtos químicos e, no longo prazo, aumentar a corrosão de equipamentos e geração de resíduos secundários (INNOCENZI *et al.*, 2017; TESFAYE *et al.*, 2017). Rocchetti *et al.* (2013) avaliaram a emissão de gases dos ácidos inorgânicos no processamento de resíduos eletroeletrônicos e concluíram que com o uso desses ácidos são emitidos gases como CO₂, Cl₂, SO₂ e etano. Outra desvantagem do uso de ácidos inorgânicos é que o pH da solução (líquido de lixiviação) é muito baixo e os metais não podem ser extraídos diretamente da solução; portanto, o processo é mais complexo (YAO *et al.*, 2018). Com ácidos inorgânicos, o descarte de água contendo ácidos, vapores perigosos e lixiviados ácidos são os principais problemas que levam a perdas econômicas e de energia (MESHRAM *et al.*, 2020).

4. Conclusões

A hidrometalurgia domina em comparação com outras técnicas de reciclagem, sendo uma tecnologia viável para a extração de metais preciosos das BL.

Os resultados dos estudos da literatura demonstraram que os ácidos orgânicos têm boa eficiência na extração de lítio, níquel, cobalto e manganês de BL que os tornam uma opção viável no uso nos processos de reciclagem, embora tenham uma eficiência um pouco menor que os inorgânicos. Os ácidos orgânicos ainda precisam ser examinados com maior abrangência experimental para a lixiviação das BL, ajudando a



evitar agentes tóxicos danosos ao processo (flúor, cloro e enxofre), diminuindo a complexidade do gerenciamento do processo e assim, diminuindo a perda de energia.

As pesquisas experimentais mostraram que os ácidos orgânicos são amigáveis com o meio ambiente, por não emitir gases de efeito estufa e podem ser reciclados após seu uso. Assim, a possibilidade de usar-se ácidos orgânicos na lixiviação para a separação dos elementos das baterias de lítio pode criar uma situação vantajosa tanto econômica quanto ambiental.

Ácidos inorgânicos			Ácidos orgânicos		
Substância	Referências	Eficiência (%)	Substância	Referências	Eficiência (%)
Ácido clorídrico	Wang <i>et al.</i> (2009); Shuva & Kurny (2013); Guzolu <i>et al.</i> (2016); Silva <i>et al.</i> (2018)	Co: 97-99 Li: 97-98 Mn: 98-99 Ni: 97-99	Ácido cítrico	Fan <i>et al.</i> (2016); Zheng <i>et al.</i> (2016)	Co: 90-97 Li: 89-100 Mn: 28-98 Ni: ≈93
Ácido nítrico	Lee & Rhee (2002); Wang <i>et al.</i> (2018)	Co: 50-95 Li: 80-95 Mn: ≈20 Ni: ≈40	Ácido oxálico	Sun & Qiu (2012); Zeng <i>et al.</i> (2015)	Co: 97-98 Li: ≈98
Ácido sulfúrico	Chen & Ho (2018); Meshram <i>et al.</i> (2014); Silva <i>et al.</i> , (2018); Wang <i>et al.</i> (2018)	Co: 66-98 Li: 90-99 Mn: 50-98 Ni: 96-98	Ácido málico	Li <i>et al.</i> (2010); Sun <i>et al.</i> (2017)	Co: 46-98 Li: 82-99 Mn: ≈99 Ni: ≈99
Ácido fluorhídrico	Silva <i>et al.</i> (2018)	Co: ≈98 Li: 80-97	Ácido tartárico	Cheng (2018); He <i>et al.</i> (2017)	Co: 46,6-99,31 Li: 82,7-99,07 Mn: 99,3 Ni: 99,31
Ácido fórmico	Silva <i>et al.</i> (2018)	Co: ≈85 Li: ≈83			

Tabela 3 – Ácidos usados na literatura para a Lixiviação
Fonte: Elaborada pelos autores.

5. Considerações Finais

Esse estudo apresenta-se como uma base para o trabalho experimental visando desenvolver uma rota tecnológica para a recuperação dos elementos valiosos das BL no CTI Renato Archer, que possa ser oferecida e implantada no setor empresarial e industrial do país.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico (CNPq) e o Centro de Tecnologia da Informação (CTI) Renato Archer.



Referências

- AWASTHI, A. K.; LI, J.; KOH, L.; OGUNSEITAN, Oladele A.. Circular economy and electronic waste. **Nature Electronics**, [S.L.], v. 2, n. 3, p. 86-89, 15 mar. 2019. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/s41928-019-0225-2>.
- CHEN, W. S.; HO, H. J.. Leaching Behavior Analysis of Valuable Metals from Lithium-Ion Batteries Cathode Material. **Key Engineering Materials**, [S.L.], v. 775, p. 419-426, ago. 2018. Trans Tech Publications, Ltd.. <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.775.419>.
- CHEN, X; LUO, C.; ZHANG, J., KONG, J.; ZHOU, T. Sustainable Recovery of Metals from Spent Lithium-Ion Batteries: A Green Process. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 3, n. 12, p. 3104–3113, 2015.
- CHENG, Q. Effect of Different Reductants on Leaching Lithium and Cobalt from Lithium Ion Batteries in Tartaric Acid Solution. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, [S.L.], v. 192, p. 012007, 5 nov. 2018. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/192/1/012007>.
- DU, K; ANG, E. H.; WU, X.; LIU, Y. Progresses in Sustainable Recycling Technology of Spent Lithium-Ion Batteries. **Energy & Environmental Materials**, [S.L.], v. 5, n. 4, p. 1012-1036, 9 mar. 2022. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/eem2.12271>.
- FAN, B; CHEN, X; ZHOU, T; ZHANG, J; XU, B. A sustainable process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 34, n. 5, p. 474-481, 7 mar. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0734242x16634454>.
- FORTI, V.; BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: the global e-waste monitor 2020**. Bonn, Geneva e Rotterdam: UNU, UNITAR, UIT, ISWA, 2020. 120 p. Disponível em: <https://collections.unu.edu/view/UNU:7737>. Acesso em: 03 ago. 2023.
- FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Brasil tem 424 milhões de dispositivos digitais em uso**, revela a 31ª Pesquisa Anual do FGVcia. Portal FGV, 2020. Disponível em: <<https://portal.fgv.br/noticias/brasil-tem-424-milhoes-dispositivos-digitais-uso-revela-31a-pesquisa-anual-fgvcia>>. Acesso em: 14 agos. 2004.
- GARCIA, E.M.; SANTOS, J.s.; PEREIRA, E.C.; FREITAS, M.B.J.G.. Electrodeposition of cobalt from spent Li-ion battery cathodes by the electrochemistry quartz crystal microbalance technique. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 185, n. 1, p. 549-553, out. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.07.011>.
- GOLMOHAMMADZADEH, R.; RASHCHI, F.; VAHIDI, E. Recovery of lithium and cobalt from spent lithium-ion batteries using organic acids: process optimization and kinetic aspects. **Waste Management**, [S.L.], v. 64, p. 244-254, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.03.037>.
- GUZOLU, Jafar Sharrivar; GHARABAGHI, Mahdi; MOBIN, Mohammad; ALILO, Hojat. Extraction of Li and Co from Li-ion Batteries by Chemical Methods. **Journal Of The Institution Of Engineers (India): Series D**, [S.L.], v. 98, n. 1, p. 43-48, 25 maio



2016. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s40033-016-0114-z>.

HE, Li-Po; SUN, Shu-Ying; MU, Yan-Yu; SONG, Xing-Fu; YU, Jian-Guo. Recovery of Lithium, Nickel, Cobalt, and Manganese from Spent Lithium-Ion Batteries Using l-Tartaric Acid as a Leachant. **Acs Sustainable Chemistry & Engineering**, [S.L.], v. 5, n. 1, p. 714-721, 18 nov. 2016. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.6b02056>

HOREH, N. B; MOUSAVI, S.M.; SHOJAOSADATI, S.A.. Bioleaching of valuable metals from spent lithium-ion mobile phone batteries using *Aspergillus niger*. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 320, p. 257-266, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.04.104>.

INNOCENZI, V; MICHELIS, I de; VEGLIÒ, F. Design and construction of an industrial mobile plant for WEEE treatment: investigation on the treatment of fluorescent powders and economic evaluation compared to other e-wastes. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, [S.L.], v. 80, p. 769-778, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tice.2017.09.019>.

LEE, C. K.; RHEE, K. Preparation of LiCoO₂ from spent lithium-ion batteries. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 109, n. 1, p. 17-21, jun. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7753\(02\)00037-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0378-7753(02)00037-x).

LI, B; GAO, X; LI, J; YUAN, C. Life Cycle Environmental Impact of High-Capacity Lithium Ion Battery with Silicon Nanowires Anode for Electric Vehicles. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 48, n. 5, p. 3047-3055, 14 fev. 2014. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es4037786>.

LI, J.; WANG, G.; XU, Z. Generation and detection of metal ions and volatile organic compounds (VOCs) emissions from the pretreatment processes for recycling spent lithium-ion batteries. **Waste Management**, [S.L.], v. 52, p. 221-227, jun. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.011>.

LI, L; BIAN, Y.; ZHANG, X.; XUE, Q.; FAN, E.; WU, F.; CHEN, R.. Economical recycling process for spent lithium-ion batteries and macro- and micro-scale mechanistic study. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 377, p. 70-79, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2017.12.006>.

LI, L; GE, J; CHEN, R.; WU, F.; CHEN, S.; ZHANG, X.. Environmental friendly leaching reagent for cobalt and lithium recovery from spent lithium-ion batteries. **Waste Management**, [S.L.], v. 30, n. 12, p. 2615-2621, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2010.08.008>.

MAKWARIMBA, C. P.; TANG, M.; PENG, Y.; LU, S.; ZHENG, L.; ZHAO, Z.; ZHEN, A. Assessment of recycling methods and processes for lithium-ion batteries. **Iscience**, [S.L.], v. 25, n. 5, p. 104321, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.isci.2022.104321>.



MARSHALL, J.; GASTOL, D.; SOMMERVILLE, R.; MIDDLETON, B.; GOODSHIP, V.; KENDRICK, E. Disassembly of Li ion cells—characterization and safety considerations of a recycling scheme. **Metals**, v. 10, n. 6, p. 1–22, 2020.

MARTINS, L. S.; GUIMARÃES, L. F.; BOTELHO JUNIOR, A. B.; TENÓRIO, J. A. S.; ESPINOSA, D. C. R.. Electric car battery: an overview on global demand, recycling and future approaches towards sustainability. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 295, p. 113091, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113091>.

MCMANUS, M. C. Environmental consequences of the use of batteries in low carbon systems: The impact of battery production. **Applied Energy**, v. 93, p. 288–295, 2012

MESHARAM, Pratima; MISHRA, Abhilash; ABHILASH; SAHU, Rina. Environmental impact of spent lithium ion batteries and green recycling perspectives by organic acids – A review. **Chemosphere**, [S.L.], v. 242, p. 125291, mar. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.125291>.

MESHARAM, P.; PANDEY, B.D.; MANKHAND, T.R. Extraction of lithium from primary and secondary sources by pre-treatment, leaching and separation: a comprehensive review. **Hydrometallurgy**, [S.L.], v. 150, p. 192-208, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.10.012>.

MESHARAM, P.; PANDEY, B.D.; MANKHAND, T.R.. Hydrometallurgical processing of spent lithium ion batteries (LIBs) in the presence of a reducing agent with emphasis on kinetics of leaching. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 281, p. 418-427, dez. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.06.071>.

MOAZZAM, P.; BOROUMAND, Y.; RABIEI, P.; BAGHBADERANI, S. S.; MOKARIAN, P.; MOHAGHEGHIAN, F.; MOHAMMED, L. J.; RAZMJOU, A. Lithium bioleaching: an emerging approach for the recovery of li from spent lithium ion batteries. **Chemosphere**, [S.L.], v. 277, p. 130196, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130196>.

NARINS, T P.. The battery business: lithium availability and the growth of the global electric car industry. **The Extractive Industries And Society**, [S.L.], v. 4, n. 2, p. 321-328, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.exis.2017.01.013>.

NATKUNARAJAH, N.; SCHARF, M.; SCHARF, P. Scenarios for the Return of Lithium-ion Batteries out of Electric Cars for Recycling. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 29, p. 740-745, 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.170>

ORDOÑEZ, J.; GAGO, E.J.; GIRARD, A. Processes and technologies for the recycling and recovery of spent lithium-ion batteries. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 60, p. 195-205, jul. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.363>.

PAULINO, J. F.; BUSNARDO, N. G.; AFONSO, J. C.. Recovery of valuable elements from spent Li-batteries. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 150, n. 3, p. 843-849, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.10.048>



ROCCHETTI, L.; VEGLIÒ, F.; KOPACEK, B.; BEOLCHINI, F. Environmental Impact Assessment of Hydrometallurgical Processes for Metal Recovery from WEEE Residues Using a Portable Prototype Plant. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], p. 130125102742005, 25 jan. 2013. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/es302192t>.

SAVINI, F. The circular economy of waste: recovery, incineration and urban reuse. **Journal Of Environmental Planning And Management**, [S.L.], v. 64, n. 12, p. 2114-2132, 9 fev. 2021. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/09640568.2020.1857226>.

SHAW-STEWART, J.; ALVAREZ-REGUERA, A.; GRESZTA, A.; MARCO, J.; MASOOD, M.; SOMMERVILLE, R.; KENDRICK, E.. Aqueous solution discharge of cylindrical lithium-ion cells. **Sustainable Materials And Technologies**, [S.L.], v. 22, p. 00110, dez. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2019.e00110>.

SHUVA, M. A. H.; KURNY, A. S. W. Hydrometallurgical recovery of value metals from spent lithium ion batteries. **American Journal of Materials Engineering and Technology**, v. 1, n. 1, p. 8–12, 2013.

SILVA, R.; AFONSO, J.; MAHLER, C. Lixiviação ácida de baterias íon-lítio. **Química Nova**, [S.L.], v. 41, n. 5, p. 581-586, 2018. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170207>.

SOMMERVILLE, R.; SHAW-STEWART, J.; GOODSHIP, V.; ROWSON, N.; KENDRICK, E.. A review of physical processes used in the safe recycling of lithium ion batteries. **Sustainable Materials And Technologies**, [S.L.], v. 25, p. 00197, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00197>

SU, Yuhao. Comparative Analysis of Lithium Iron Phosphate Battery and Ternary Lithium Battery. **Journal Of Physics: Conference Series**, [S.L.], v. 2152, n. 1, p. 012056, 1 jan. 2022. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/2152/1/012056>.

SUN, L.; QIU, K.. Organic oxalate as leachant and precipitant for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. **Waste Management**, [S.L.], v. 32, n. 8, p. 1575-1582, ago. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.027>.

SUN, Z.; CAO, H.; XIAO, Y.; SIETSMA, J.; JIN, W.; AGTERHUIS, H.; YANG, Y. Toward Sustainability for Recovery of Critical Metals from Electronic Waste: The Hydrochemistry Processes. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, n. 1, p. 21–40, 2017.

TESFAYE, F.; LINDBERG, D.; HAMUYUNI, J.; TASKINEN, P.; HUPA, L.. Improving urban mining practices for optimal recovery of resources from e-waste. **Minerals Engineering**, [S.L.], v. 111, p. 209-221, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mineng.2017.06.018>.

TURCHENIUK, K.; BONDAREV, D.; SINGHAL, V.; YUSHIN, G.. Ten years left to redesign lithium-ion batteries. **Nature**, [S.L.], v. 559, n. 7715, p. 467-470, jul. 2018.



Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-018-05752-3>.

WANG, R.; LIN, Y.; WU, S.. A novel recovery process of metal values from the cathode active materials of the lithium-ion secondary batteries. **Hydrometallurgy**, [S.L.], v. 99, n. 3-4, p. 194-201, nov. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hydromet.2009.08.005>.

WANG, W. Y.; YEN, C. H.; LIN, J. L.; XU, R. B. Recovery of high-purity metallic cobalt from lithium nickel manganese cobalt oxide (NMC)-type Li-ion battery. **Journal Of Material Cycles And Waste Management**, [S.L.], v. 21, n. 2, p. 300-307, 12 set. 2018. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10163-018-0790-x>.

XU, J.; THOMAS, H. R.; FRANCIS, R. W.; LUM, K. R.; WANG, J.; LIANG, B. A review of processes and technologies for the recycling of lithium-ion secondary batteries. **Journal Of Power Sources**, [S.L.], v. 177, n. 2, p. 512-527, mar. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.11.074>.

YAO, Y.; ZHU, M.; ZHAO, Z.; TONG, B.; FAN, Y.; HUA, Z. Hydrometallurgical Processes for Recycling Spent Lithium-Ion Batteries: A Critical Review. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 6. N 11, 2018, p. 13611–13627
Hydrometallurgical Processes for Recycling Spent Lithium-Ion Batteries: a critical review. *Acs Sustainable Chemistry & Engineering*, [S.L.], v. 6, n. 11, p. 13611-13627, 5 set. 2018. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03545>.

ZENG, X.; LI, J.; SHEN, B. Novel approach to recover cobalt and lithium from spent lithium-ion battery using oxalic acid. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 295, p. 112-118, set. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.02.064>.

ZHANG, G.; YUAN, X.; HE, Y.; WANG, H.; ZHANG, T.; XIE, W. Recent advances in pretreating technology for recycling valuable metals from spent lithium-ion batteries. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 406, p. 124332, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.124332>.

ZHAO, J.; ZHANG, B.; XIE, H.; QU, J.; QU, X.; XING, P.; YIN, H. Lithium-Ion Battery Cathodes Using Ethanol As the Reducing. **Environmental Research**, v. 181, , p. 108803, 2019.

ZHENG, Y.; LONG, H. L.; ZHOU, L.; WU, Z. S.; ZHOU, X.; YOU, L.; YANG, Y.; LIU, J. W. Leaching Procedure and Kinetic Studies of Cobalt in Cathode Materials from Spent Lithium Ion Batteries using Organic Citric acid as Leachant. **International Journal of Environmental Research**, v. 10, n. 1, p. 159–168, 2016.



SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS
9 a 11 de outubro de 2023

RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS COMO FONTE SECUNDÁRIA DE MATERIAIS CRÍTICOS E ESTRATÉGICOS

Marcelo Pilotto Cenci, Priscila Silva Silveira, Felipe Antônio Lucca Sánchez,
Andréa Moura Bernardes, Hugo Marcelo Veit

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais –
PPGE3M
Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais - LACOR
* felipe.lucsan@gmail.com

Resumo

As taxas de geração de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos – REEE é crescente no mundo todo e as estimativas futuras não demonstram que estas taxas irão apresentar uma tendência de queda ou mesmo de estabilização. Diversos equipamentos fazem parte dos REEE, entre eles, computadores, smartphones, baterias, lâmpadas, painéis solares, dentre outros. A composição destes resíduos é extremamente variável incluindo, além de polímeros e cerâmicos, metais considerados tradicionais, preciosos, tóxicos, críticos e/ou estratégicos. Neste contexto, é possível associar os REEE como uma importante fonte secundária para diversos tipos de materiais críticos e estratégicos. A condição para que um material seja considerado crítico ou estratégico é realizada de diferentes maneiras por diferentes países. O Brasil, assim como diversos outros países, possui também uma lista de materiais estratégicos. Assim, o objetivo deste trabalho foi caracterizar alguns tipos de REEE a fim de verificar a presença e suas quantidades de materiais considerados estratégicos ao Brasil neste tipo de fonte secundária de materiais. Os REEE estudados (placas de circuito impresso, baterias, LED e painéis solares) foram inicialmente cominuidos em moinhos de facas e após foi realizada digestão ácida. As soluções obtidas foram analisadas via ICP-OES a fim de identificar e quantificar os principais metais presentes. Em todos eles foram identificados metais considerados estratégicos, com destaque especial para a presença de Al, Cu, Ni, Li, Co, Si, Au e Terras raras. Conclui-se que os REEE devem ser considerados como fontes importantes de matéria prima secundária para a obtenção dos chamados materiais estratégicos.

Palavras-chave: REEE, Caracterização, Materiais Estratégicos.



1. Introdução

Em relatório divulgado pela *United Nations University* (UNU), em 2020, a geração mundial de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) foi estimada em 53,6 milhões de toneladas anuais (7,3 kg per capita), sendo os REEE a categoria de resíduo sólido com maior crescimento de geração nos últimos anos (de 9,2, em 2014, para previsão de 74,7 milhões de toneladas anuais em 2030) (FORTI *et al.*, 2020).

O contexto da geração de REEE também inclui a alta informalidade no manejo de fim de vida, com apenas 17,4 % destinados e documentados por meios formais, principalmente devido às dificuldades tecnológicas na coleta e reciclagem que os atores desse processo ainda encontram (FORTI *et al.*, 2020). A partir desse cenário, o relatório aponta que a reciclagem é estratégia fundamental para minimização dos impactos ambientais e sociais provenientes da geração de REEE, sendo componente importante da Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável nos objetivos 3, 6, 8, 11, 12 e 14.

Além das questões de sustentabilidade, a geração de REEE e a sua reciclagem ganharam contornos estratégicos para a área de abastecimento de nações e empresas. REEE podem conter quantidades significativas de materiais valiosos, não apenas economicamente, mas para o domínio tecnológico e de mercado de produtos da chamada tecnologia da informação CENCI *et al.*, 2021). A busca de soluções para mitigar a vulnerabilidade estratégica do abastecimento desses materiais, que, por definição, já possuem disponibilidade limitada, é um importante foco de pesquisa atual, e a reciclagem de REEE surge como alternativa promissora para muitos deles.

Diversos países e regiões possuem suas listas de materiais críticos e estratégicos definidas, divulgadas, e periodicamente atualizadas, com destaque para as listas dos Estados Unidos da América, União Europeia e China. Apesar de algumas diferenças de metodologias adotadas na definição de quais materiais são considerados críticos e estratégicos, essas listas, basicamente, explicitam os principais materiais para evitar a vulnerabilidade de abastecimento e que representam ganhos estratégicos importantes no mercado mundial.

Nesse sentido, o Brasil, através da Resolução nº 2, de 18 de junho de 2021, do Ministério de Minas e Energia, divulgou a sua própria lista de materiais estratégicos (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2021). A lista brasileira possui semelhanças de formato com a Chinesa, apresentando as categorias de minerais que o país depende de importação, que tem importância pela aplicação em produtos e processos de alta tecnologia e que são essenciais para promover o superávit na balança comercial brasileira. Na Tabela 1, são apresentados os materiais estratégicos considerados pelo Brasil.

Tabela 1. Lista de materiais estratégicos brasileiros

Dependentes de importação	Importância tecnológica	Essenciais para superávit
Enxofre	Cobalto	Alumínio
Fosfato	Cobre	Cobre
Potássio	Estanho	Ferro
Molibdênio	Grafita	Grafita



Grupo da Platina	Ouro
Lítio	Manganês
Nióbio	Nióbio
Níquel	Urânio
Silício	
Tálio	
Tântalo	
Terras Raras	
Titânio	
Tungstênio	
Urânio	
Vanádio	

Desde 1997 são realizados estudos na temática de reciclagem de REEE no Laboratório de Corrosão, Proteção e Reciclagem de Materiais (LACOR) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), demonstrando a importância da reciclagem de REEE (BERNARDES, A. M. *et al.*, 1997; VEIT, H. M. *et al.*, 2000; VEIT, H. M. *et al.*, 2002, VEIT, H. M., *et al.*, 2005). No contexto atual de vulnerabilidades e pressão geopolítica, esse trabalho apresenta o potencial dos REEE como fonte secundária de materiais estratégicos para o mercado brasileiro.

O objetivo desse trabalho é compilar e explorar a caracterização química de alguns dos principais tipos de REEE estudados no LACOR, avaliando quais materiais podem ser recuperados de acordo com a Tabela 1. A indústria de reciclagem de REEE brasileira ainda está em seus primeiros passos, com predominância de atividades manuais e exportação das partes mais valiosas para o exterior (DIAS, P. *et al.*, 2022; JUNIOR *et al.*, 2023), e é esperado que esse estudo ressalte a importância do manejo adequado e melhor aproveitamento desses resíduos dentro das fronteiras brasileiras.

2. Metodologia

Neste trabalho serão apresentadas as caracterizações químicas realizadas para os seguintes equipamentos: placas de circuito impresso (PCI) de smartphones, lâmpadas LED, baterias de íons de lítio e painéis fotovoltaicos. Todas as caracterizações foram realizadas através de digestão ácida com água régia (somente com ácido nítrico para digestão da prata) e análise ICP-OES. As soluções de digestão foram processadas com razão sólido/líquido de 1g/20mL, tempo de 2 horas, temperatura entre 60 e 80°C e agitação entre 300-400 rpm. Detalhes da amostragem para cada equipamento são informados a seguir.

2.1 PCI de smartphones

Foi realizada coleta de 40 aparelhos smartphones com fabricação entre 2012 e 2020, com as PCI sendo removidas manualmente. Os ímãs foram removidos e desmagnetizados através de aquecimento em forno mufla. Todo material das PCI passou conjuntamente por moagem em moinho de facas até 100% passante em 2mm.



As amostras, em triplicata, para digestão ácida e análise ICP-OES foram coletadas em equipamento quarteador.

2.2 Lâmpadas LED

Foi realizada coleta de 90 lâmpadas LED (15 lâmpadas de 6 diferentes marcas, sendo 3 marcas de lâmpadas tubulares e 3 marcas de lâmpadas de bulbo). Todas as lâmpadas foram abertas manualmente e seus componentes processados em moagem (até 100% passante em 2mm) e quarteamento de amostras para caracterização individual em triplicata (digestão ácida e análise ICP-OES). Para obtenção da caracterização da composição de lâmpadas LED inteiras, as caracterizações dos componentes foram somadas considerando o balanço de massas entre eles. Detalhes da metodologia e resultados estão disponíveis em Cenci et al. 2020).

2.3 Baterias de íons de lítio

Foram coletadas baterias de íons de lítio de 40 smartphones descartados com fabricação entre 2012 e 2020. As baterias foram retiradas manualmente, descarregadas, processadas conjuntamente em moinho de facas (até 100% passante em 2mm) e quarteadas para obtenção de amostras em triplicatas. Para smartphones, são esperadas, majoritariamente, baterias de óxido de cobalto e baterias de óxidos de níquel, manganês e cobalto. As amostras foram analisadas através de digestão ácida e análise ICP-OES.

2.4 Painéis Fotovoltaicos

Um módulo fotovoltaico (FV) de silício policristalino (fabricação em 2018) foi caracterizado quanto à composição percentual de materiais e elementos químicos. A moldura e a caixa de junção foram removidas e pesadas, ao passo que a moldura foi analisada por FRX. Após remoção da moldura de alumínio e da caixa de junção, 500 g do laminado FV foram processados em moinho de facas a 1500 rpm (até 100% passante em 1 mm). Após quarteamento, 3 amostras de 20g do laminado moído foram submetidas à digestão ácida (HNO_3 PA, S/L: 1/20, temperatura ambiente, 6h e agitação de 300-400 rpm) e posterior análise por ICP-OES.

3. Resultados

3.1 PCI de smartphones

As PCI são consideradas como um dos tipos de REEE mais valiosos economicamente, e apresentam composição abrangente em número de elementos que podem ser encontrados (BOOKHAGEN *et al.*, 2020; D'ADAMO *et al.*, 2019; VEIT *et al.*, 2013; KASPER *et al.* 2017). Na Tabela 2 são mostrados os resultados da caracterização química para PCI de smartphones. De fato, na questão econômica, há destaque para as concentrações de Au, Ag e Cu, apresentando valores maiores que os normalmente encontrados em minérios típicos (CENCI *et al.*, 2020). Esses elementos também são os que concentram o maior número de publicações científicas para sua reciclagem (CENCI; EIDELWEIN; VEIT, 2023).



Tabela 2. Concentração de elementos encontrados em PCI de smartphones

Elemento	Concentração (%)	Elemento	Concentração (%)
Ag	0,06	Nb	0,03
Al	1,39	Nd	0,26
Au	0,22	Ni	4,59
Co	0,04	Pb	0,07
Cr	2,06	Pd	0,08
Cu	43,35	Pr	0,06
Fe	16,96	Pt	<LDQ
Ga	0,04	Sb	0,06
Li	0,08	Sn	2,54
Mg	0,07	W	0,09
Mn	0,17	Zn	2,86
Mo	0,03		

LDQ: limite de quantificação

Na questão estratégica, considerando a lista brasileira (Tabela 1) para comparação, foram identificados vários materiais presentes (Mo, Cu, Co, Sn, Nd, Pr, Au, Pd, Li, Nb, Ni, Fe, Al, Mn e W). Dentre esses elementos, há destaque para as altas concentrações de Cu, Fe, Sn, Ni, Au e Nd. Outros elementos, como Ga e Sb, estão presentes em listas de materiais estratégicos de outros países e regiões, podendo também ser relevantes para recuperação em contextos diferentes.

Um ponto importante a ser explorado é como realizar um aproveitamento adequado desse resíduo para a reciclagem desses materiais estratégicos. Para as PCI, devido à alta concentração de Cu, a abordagem industrial tradicional é através da inclusão desses resíduos nos processos de metalurgia do Cu (GHOSH *et al.*, 2015; KAYA, 2016).

A metalurgia do Cu (pirometalurgia) permite um bom aproveitamento dos metais que ficam diluídos na liga metálica coletora de Cu. Através do processo de eletrorefino, em que o Cu produzido é purificado, é gerado um concentrado dos elementos metálicos coletados (Au, Sn, Ni, Mo, Co, Pd poderiam ser concentrados e recuperados) (REUTER *et al.*, 2019). Os elementos Fe e terras raras (Nd e Pr), que possuem concentração relevante nas PCI, poderiam ser retirados previamente por separação magnética, aumentando o aproveitamento das rotas de reciclagem.

3.2 Lâmpadas LED

As lâmpadas LED são um tipo de REEE relativamente novo e pouco estudado para a reciclagem. Porém, já dominam o mercado de iluminação há alguns anos, e é esperado ainda grande crescimento de consumo (UNEP, 2017; ZISSIS; BERTOLDI, 2018). As lâmpadas LED são compostas, normalmente, de quatro componentes: PCI, carcaça polimérica e metálica, LEDs e módulo LED (suporte onde são posicionados os



LEDs) (CENCI *et al.*, 2020). A Tabela 3 corresponde à média entre as concentrações das lâmpadas tubulares e de bulbo inteiras, encontradas no estudo de Cenci et al. (2020).

Tabela 3. Concentração de elementos encontrados em lâmpadas LED

Elemento	Concentração (%)
Ag	0,01
Al	24,04
Cu	3,07
Fe	1,32
Ga	0,01
Ni	0,52
Pb	0,02
Au	0,01
Sn	1,95
Y	0,01

A grande concentração de Al (material estratégico brasileiro) é devido à presença de placas metálicas na carcaça e nos módulos LED. Essas placas podem ser facilmente recuperadas mecanicamente, pois são um componente homogêneo que não necessita de processos metalúrgicos extrativos (CENCI *et al.*, 2020; MARTINS; TANABE; BERTUOL, 2020).

Mesmo contendo uma PCI, a caracterização de uma lâmpada LED não apresenta a grande diversidade e concentração de elementos como uma PCI de smartphones. As PCI de lâmpadas LED são consideradas menos valiosas, sendo reportadas concentrações menores para elementos economicamente valiosos e estratégicos (CENCI *et al.*, 2020). Cu, Fe, Ni, Sn, Au e Y são os outros elementos estratégicos brasileiros (além do Al) encontrados em lâmpadas LED. Cu, Sn e Fe são encontrados majoritariamente nas PCI, enquanto o Ni é encontrado nas carcaças das lâmpadas de bulbo (CENCI *et al.*, 2020). O elemento Au está presente nos componentes PCI, LEDs e módulos, e o elemento Y está presente exclusivamente nos LEDs, tendo recuperação dificultada pelo encapsulamento polimérico (CENCI *et al.*, 2021).

A reciclagem das lâmpadas LED ainda é incipiente na indústria. De maneira geral, a recuperação de Al, material estratégico com maior concentração, é possível através de processos simples realizados por pequenos recicladores. Uma vez que o Al é recuperado, o material pode ser processado como outros REEE na metalurgia primária do Cu, potencialmente aproveitando as concentrações de Cu, Au, Ni e Sn.

3.3 Baterias de íons de lítio

Existem diversos tipos de baterias de íons de lítio. As comumente presentes em REEE são as de óxido de cobalto, óxido de níquel-manganês-cobalto, óxido de manganês e ferro fosfato (ABU *et al.*, 2023). Na Tabela 4, estão presentes as concentrações encontradas em uma mistura de 40 baterias de smartphones, em que é



esperada a presença de diversos tipos de baterias, porém, com predominância de óxidos de cobalto, níquel e manganês.

Tabela 4. Concentração de elementos encontrados em baterias de lítio de smartphones

Elemento	Concentração (%)
Al	19,94
Co	24,05
Cr	0,03
Cu	10,98
Fe	0,54
Li	2,83
Mg	0,11
Mn	1,67
Ni	0,71
Pb	<LDQ
Sn	0,14
Zn	0,09

LDQ: limite de quantificação

Primeiramente, há grande concentração de Al e Cu, metais estratégicos para o superávit da balança comercial (MODEL; VEIT, 2023; BERNARDES et al., 2015). Al e Cu são utilizados nas baterias como coletores de corrente (superfície metálica em que o material do cátodo e ânodo são posicionados). O Al, adicionalmente, é utilizado nas carcaças das baterias.

Além do Al e do Cu, há presença dos materiais estratégicos Co, Fe, Li, Mn, Ni e Sn, com destaque para a alta concentração de Co. É importante mencionar que o material que forma o ânodo das baterias é grafite (ausente da caracterização química da Tabela 4) (RAJ *et al.*, 2022), podendo ser considerado adicionalmente como um material estratégico (grafita, na Tabela 1). A recuperação de grafite é raramente abordada em trabalhos de reciclagem (CENCI; EIDELWEIN; VEIT, 2023), representando uma lacuna de conhecimento a ser preenchida.

A busca por um processo de reciclagem para baterias de íons de lítio foi um tópico de grande interesse na pesquisa científica nos últimos anos. Majoritariamente, os processos convergem para uma etapa de concentração de materiais do ânodo e do cátodo (chamado *blackmass*), em que também é gerada uma fração concentrada de Cu e Al (RAJ *et al.*, 2022). A partir da *blackmass*, podem ser aplicados diversos métodos extrativos para recuperação do Li, Co, Mn, Ni e Fe, com predominância de técnicas hidrometalúrgicas, pois, na pirometalurgia, o Li é comumente perdido na escória (ALI; KHAN; PECHT, 2021; LATINI *et al.*, 2022).



3.4 Painéis Fotovoltaicos

A moldura representa cerca de 22,34%, a caixa de junção 2,49% e o laminado FV (módulo sem moldura e caixa de junção) representa 75,17% do módulo, em massa. Identificou-se que a moldura é composta por uma liga de alumínio anodizada, tipo 6063T5. Considerando o valor de mercado do Al, a moldura é considerada uma fonte econômica substancial e listada como material estratégico na lista brasileira. Na Tabela 5, estão apresentadas as concentrações de elementos e materiais específicos no laminado FV.

Tabela 5. Concentração de elementos encontrados em laminados fotovoltaicos (módulos sem moldura e caixa de junção).

Elemento	Concentração (%)
Ag	0,10
Al	1,37
Cu	3,21
Fe	0,51
Pb	0,15
Sn	0,23
Si	6,23

Conforme visto na Tabela 5, os módulos fotovoltaicos apresentam em sua composição metais com alto valor agregado (Ag, Al, Cu e Si cristalino), entretanto, métodos físicos são necessários para concentrá-los previamente e, dessa forma, reduzir o consumo de reagentes ou energia numa etapa posterior de recuperação por tratamento químico ou térmico (CAMARGO, 2021; CAMARGO *et al.*, 2023; DIAS *et al.*, 2018; DIAS, P. R. *et al.*, 2022; DIAS; BENEVIT; VEIT, 2016). Dentre estes elementos citados, o Al, Cu e Si constam na lista brasileira de materiais estratégicos. Embora a Ag não esteja listada como estratégica, sabemos que, por seu alto valor econômico, é um elemento de grande interesse a ser reciclado a partir de painéis fotovoltaicos.

Outro ponto importante foi a detecção de chumbo, associado às soldas de chumbo e estanho que revestem as fitas de cobre a fim de uni-las à célula FV. A redução da aplicação desse metal e o desenvolvimento de soldas alternativas é fundamental por causa de sua periculosidade e diretivas como a RoHS (ABNT, 2004; BORTHAKUR, 2020)

Vale destacar que aproximadamente 80% do laminado é composto por vidro (não citado na Tabela 5), o qual pode ser encaminhado para a reciclagem desde que esteja livre de outros contaminantes. Contudo, a separação do total do vidro sem misturá-lo com outros materiais é um desafio tecnológico, especialmente porque muitos estudos focam em processos iniciais de moagem.



4. Conclusões

Os resultados apresentados, baseados na experiência do grupo de pesquisa do LACOR, demonstram que REEE são uma importante matéria prima secundária para obtenção de materiais estratégicos com alto valor agregado. Este trabalho demonstrou a presença de diversos metais (Al, Cu, Ni, Li, Co, Si, Au e Terras raras) considerados críticos e estratégicos, não apenas pelo Brasil, e em quantidades elevadas nos REEE. Estas matérias primas secundárias podem incentivar ações de mineração urbana e promover a economia circular no país.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES, FAPERGS e FINEP pelo auxílio financeiro na execução deste trabalho.

Referências

- ABNT. Norma Brasileira ABNT NBR 10004: Classificação de Resíduos Sólidos. **ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas)**, [s. l.], p. 1–6, 2004.
- ABU, Sayem M. *et al.* State of the art of lithium-ion battery material potentials: An analytical evaluations, issues and future research directions. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], p. 136246, 2023.
- ALI, Hayder; KHAN, Hassan A.; PECHT, Michael G. Circular economy of Li Batteries: Technologies and trends. **Journal of Energy Storage**, [s. l.], v. 40, p. 102690, 2021.
- BERNARDES, A. M.; BOHLINGER, I.; WUTH, W. Pyrometallurgische verarbeitung von galvanikschlamm: untersuchung der metallverteilung. **Galvanotechnik**, v. 88, n.5, p. 1646-1655, 1997.
- BERNARDES, A. M.; COSTA, A. J.; MATOS, J. F.; MÜLLER, I. L. Beneficiation of cobalt, copper and aluminum from wasted lithium-ion batteries by mechanical processing. **International Journal of Mineral Processing** 145 (2015) 77–82
- BOOKHAGEN, B. *et al.* Metallic resources in smartphones. **Resources Policy**, [s. l.], v. 68, n. February, p. 101750, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101750>.
- BORTHAKUR, Anwasha. Policy approaches on E-waste in the emerging economies: A review of the existing governance with special reference to India and South Africa. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 252, p. 119885, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119885>.
- CAMARGO, Priscila Silva Silveira *et al.* c-Si PV module recycling: Analysis of the use of a mechanical pre-treatment to reduce the environmental impact of thermal treatment and enhance materials recovery. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [s. l.], p. 0734242X2311663, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0734242X231166308>.



CAMARGO, Priscila Silva Silveira *et al.* Photovoltaic module recycling: thermal treatment to degrade polymers and concentrate valuable metals. **Detritus**, [s. l.], v. 16, n. 16, p. 48–62, 2021. Disponível em: <https://digital.detritusjournal.com/doi/15119-1430>.

CAMARGO, Priscila Silva Silveira. **Recycling crystalline silicon photovoltaic modules: separation and concentration of materials**. 2021. 170 f. - Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS), [s. l.], 2021.

CENCI, Marcelo Pilotto *et al.* Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. **Waste Management**, [s. l.], v. 107, p. 285–293, 2020.

CENCI, Marcelo Pilotto *et al.* Eco-Friendly Electronics—A Comprehensive Review. **Advanced Materials Technologies**, [s. l.], 2021.

CENCI, Marcelo Pilotto *et al.* Precious and critical metals from wasted LED lamps: Characterization and evaluation. **Environmental Technology**, [s. l.], v. 43, n. 12, p. 1870–1881, 2020.

CENCI, Marcelo Pilotto *et al.* Separation and concentration of valuable and critical materials from wasted LEDs by physical processes. **Waste Management**, [s. l.], v. 120, p. 136–145, 2021.

CENCI, Marcelo Pilotto; EIDELWEIN, Estela Moschetta; VEIT, Hugo Marcelo. Composition and recycling of smartphones : A mini-review on gaps and opportunities. [s. l.], 2023.

D'ADAMO, Idiano *et al.* Towards sustainable recycling processes: Wasted printed circuit boards as a source of economic opportunities. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 149, p. 455–467, 2019.

DIAS, Pablo *et al.* Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic. **Cleaner Waste Systems**, [s. l.], v. 3, p. 100022, 2022.

DIAS, Pablo R. *et al.* High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: Technical, economic and environmental feasibility assessment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 169, n. August, p. 112900, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112900>.

DIAS, Pablo *et al.* Recycling Waste Crystalline Silicon Photovoltaic Modules by Electrostatic Separation. **Journal of Sustainable Metallurgy**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 176–186, 2018.

DIAS, Pablo Ribeiro; BENEVIT, Mariana Gonçalves; VEIT, Hugo Marcelo. Photovoltaic solar panels of crystalline silicon: Characterization and separation. **Waste Management & Research**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 235–245, 2016. Disponível em: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X15622812>.

FORTI, V *et al.* **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential**. Bonn/Geneva/Rotterdam: UNU/UNITAR/ITU/ISWA, 2020.



GHOSH, B. *et al.* Waste Printed Circuit Boards recycling: An extensive assessment of current status. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 94, p. 5–19, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.02.024>.

HUBER, Sandra *et al.* Emissions from the incineration of fluoropolymer materials. **Nilu**, [s. l.], 2009.

KASPER, A. C.; GARCIA-GABALDON, M.; HERRANZ, V. P.; VEIT, H. M. Electrochemical study of gold recovery from ammoniacal thiosulfate, simulating the PCBs leaching of mobile phones. **ELECTROCHIMICA ACTA**. v. 259, p. 500-509, 2017.

JUNIOR, A B Botelho *et al.* Electronic waste in emerging countries : current scenario of generation , policies , and recycling technologies regarding the coronavirus pandemic. **International Journal of Environmental Science and Technology**, [s. l.], n. 0123456789, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-023-05128-9>.

KAYA, Muammer. Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes. **Waste Management**, [s. l.], v. 57, n. 2, p. 64–90, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.004>.

LATINI, Dario *et al.* A comprehensive review and classification of unit operations with assessment of outputs quality in lithium-ion battery recycling. **Journal of Power Sources**, [s. l.], v. 546, n. August, p. 231979, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.231979>.

MARTINS, Thiago R.; TANABE, Eduardo H.; BERTUOL, Daniel A. Innovative method for the recycling of end-of-life LED bulbs by mechanical processing. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 161, p. 104875, 2020.

MODEL, J. C. M. ; VEIT, H. M. . Development of a More Sustainable Hybrid Process for Lithium and Cobalt Recovery from Lithium-Ion Batteries. **Minerals**, v. 13, p. 798, 2023.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Resolução Nº 2, de 18 de junho de 2021**. 115. ed. [S. l.]: Diário Oficial da União, 2021.

RAJ, Tirath *et al.* Recycling of cathode material from spent lithium-ion batteries: Challenges and future perspectives. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 429, n. September 2021, p. 128312, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128312>.

REUTER, Markus A. *et al.* Challenges of the circular economy: A material, metallurgical, and product design perspective. **Annual Review of Materials Research**, [s. l.], v. 49, p. 253–274, 2019.

SCHEIRS, John; KAMINSKY, Walter. **Feedstock Recycling and Pyrolysis of Waste Plastics**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2006.

UNEP. **Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient Lighting**. [S. l.], 2017.



VEIT, H. M.; PETTER, P. M. H.; BERNARDES, A. M. Evaluation of gold and silver leaching from printed circuit board of cellphones. **Waste Management** (Elmsford), v. 34, p. 475-482, 2013.

VEIT, H. M.; SALAMI, A. P.; DIEHL, T. R.; RODRIGUES, J. S.; BERNARDES, A. M.; TENÓRIO, J. A. S. Utilization of Magnetic and Electrostatic Separation in the Recycling of Printed Circuit Boards Scrap. **Waste Management** (Elmsford), <http://www.sciencedirect.com>, v. 25, n.1, p. 67-74, 2005.

VEIT, H. M.; PEREIRA, C. C.; BERNARDES, A. M. Using Mechanical Processing in Recycling Printed Wiring Boards. **JOM** (Warrendale), v. 54, n.6, p. 45-47, 2002.

VEIT, H. M.; PEREIRA, C. C.; BERNARDES, A. M. Emprego de Processamento Mecânico para Reciclagem de Sucatas de Placas de Circuito Impresso. **REAd**. Revista Eletrônica de Administração, v. 6, n.6, 2000.

ZISSIS, Georges;; BERTOLDI, Paolo. **Status of LED-Lighting world market in 2017**. Ispra: Ispra, European Commission, 2018.



RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS DE ORIGEM GOVERNAMENTAL NO BRASIL: DIAGNÓSTICO DE GERAÇÃO E MANEJO COM BASE NO ESTUDO DE CASO DO ESPÍRITO SANTO

Roger Trancozo de Jesus¹; Luciana Harue Yamane*¹; Renato Ribeiro Siman¹

¹ Laboratório de Gestão do Saneamento Ambiental (LAGESA) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

*luciana.yamane@ufes.br

Resumo

Os órgãos públicos (OP) são consumidores de equipamentos tais como *workstations* e *notebooks*, uma vez que a execução de suas atividades depende diretamente do uso de equipamentos de tecnologia da informação e comunicação (ETIC). Consequentemente, os resíduos de equipamentos de tecnologia da informação e comunicação (RETIC) compõe o montante de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) de origem governamental. No Brasil, o Decreto Federal nº10.240/2020 determina a destinação obrigatória de REEE de origem doméstica para os sistemas de logística reversa, porém não contemplam os REEE de origem governamental, que são regidos pela Lei Federal nº14.133/2021, e só podem ser doados ou destinados a leilões. No entanto, dados de geração de RETIC de origem governamental no Brasil são desconhecidos, e há poucos trabalhos na literatura internacional, sendo ainda uma lacuna. O objetivo deste artigo foi realizar um levantamento sobre as aquisições e baixas patrimoniais dos ETIC e RETIC do Governo do Espírito Santo a partir da base de dados de movimentações de bens móveis da Secretaria de Estado de Gestão e Recursos Humanos (SEGER) para estimar o potencial de geração de RETIC no Estado. Constatou-se a geração de 31 ton/ano de RETIC, onde cada funcionário público foi responsável (indiretamente) por 1,05 kg/ano. Os resultados permitiram elaborar um diagnóstico inédito sobre a geração e manejo de RETIC no ES. Ainda, com base nas informações do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada sobre o quantitativo de servidores públicos no Brasil também foi elaborada uma estimativa de geração por Estado.

Palavras-chave: Órgãos Públicos; Estimativa de geração; Resíduos eletroeletrônicos; Logística Reversa; Governamental.

1. Introdução

Dada a ampla utilização dos equipamentos eletroeletrônicos (EEE), seus resíduos podem ter origem doméstica ou não-doméstica. Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) de origem doméstica são objetos de um Sistema de Logística Reversa (SLR), ainda em fase de implantação no Brasil, após assinatura de um Acordo Setorial (MMA, 2019), e posteriormente regulamentado pelo Decreto Federal nº10.240 (BRASIL, 2020).



Já os REEE de origem comercial e industrial, em função da quantidade gerada ou da especificidade das características físicas e químicas, devem ter SLR independentes.

Os REEE de origem não-doméstica são os de uso para fins corporativos, industriais, comerciais, pessoas jurídicas ou governamentais (BRASIL, 2020). O REEE oriundo de órgãos públicos (OP) não está incluído no Decreto Federal supracitado, pois são abarcados pela Lei Federal nº 14.133/2021, conhecida como a nova Lei de Licitações e Contratos Administrativos, que determina que os bens móveis, como é o caso dos equipamentos de tecnologia da informação e comunicação (ETIC), quando chegam ao fim da vida útil, devem ser leiloados, doados, permutados ou vendidos para outros órgãos públicos (BRASIL, 2021).

Este estudo considera como OP: Instituições de Direito Público das instâncias municipais, estaduais e federais, como prefeituras e secretarias; e dos poderes executivo, legislativo e judiciário, como ministérios, assembleias e tribunais, incluindo as agências de controle, como Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) e Agência Nacional de Energia Elétrica (ANAEL).

Os ETIC adquiridos pelos OP, não possuem amparo legal que defina a responsabilidade compartilhada entre as partes interessadas. As equipes que atuam nos departamentos de aquisição (compras) e de controle de bens móveis (setor de patrimônio) dos OP seguem normas e procedimentos que se apoiam na legislação para dar ampla concorrência e maior vantajosidade ao erário público (SEGER, 2020).

As determinações supracitadas da Lei Federal nº 14.133/2021 restringem a colaboração com empresas da iniciativa privada de reciclagem dos REEE governamentais (BRASIL, 2021). Essa exclusão prejudica a inserção de materiais de volta ao ciclo produtivo, uma vez que limita a participação da indústria e gera um armazenamento inadequado e volumoso de equipamentos (GOMES *et al.*, 2017; OKORHI *et al.*, 2019; OPARA, 2020).

Os REEE, tais como os resíduos de equipamentos de tecnologia da informação e comunicação (RETIC) armazenados nos OP, quando não doados para instituições de interesse público, são baixados como inservíveis ou sucatas e leiloados.

Isso faz com que as opções de gerenciamento dos REEE de origem governamental sejam engessadas e restritas, e que eles se acumulem em locais temporários.

As etapas do manejo do REEE de origem governamental (coleta, reuso, armazenamento, doação/leilão/permuta/venda) são estabelecidas dentro de cada OP (BRASIL, 2021) por meio do sistema de controle patrimonial.

Foi observado que o manejo de REEE oriundos de OP ainda é inexplorado na literatura, principalmente no que tange às entidades governamentais brasileiras. Tendo em face às lacunas identificadas sobre a carência de informações acerca da gestão e gerenciamento dos REEE gerados em OP e das barreiras para promover o reuso e a reciclagem, a presente pesquisa teve como objetivo geral diagnosticar a geração e o manejo dos RETIC de origem governamental por meio de um estudo de caso no Espírito Santo.



Fundamentação Teórica

Revisões das literaturas como as realizadas por Shittu; Williams; Shaw (2021) sobre gerenciamento global de REEE; Islam e Huda (2018) sobre LR e EC de REEE; e Victor; Kumar, (2012) sobre obsolescência de ETIC governamentais, apontam o reuso e a reciclagem de equipamentos como forma de mitigar o impacto ambiental destes resíduos, assim como outras externalidades positivas propiciadas por tal atividade.

Como o portfólio bibliométrico é escasso e há estudos que justificaram os IES públicas como equivalentes a AG, uma vez que estão subordinadas à mesma legislação (KITILA; WOLDEMIKAEL, 2019; VASILENKO; GURASKIENĖ; VARŽINSKAS, 2009), esta pesquisa também se apoiou nos estudos sobre gestão e gerenciamento de REEE realizados em IES públicos.

Considerados de grande valia os estudos sobre “padronização da identificação e rastreio dos EEE e REEE em AG” de Kumar; Rawat (2018), o estudo de Faria et al. (2021) sobre “geração real e estimada dos REEE numa agência federal”, bem como o estudo de Victor; Kumar (2012) sobre proposta para minimizar efeitos da obsolescência programada nos ETIC alugados pelo Governo da Índia. No entanto, como não abordam especificamente o gerenciamento de REEE, estes estudos não foram considerados.

Em países como Etiópia, Nigéria e África do Sul, o procedimento de aquisição e destinação de EEE é similar ao brasileiro (BOB *et al.*, 2017; KITILA; WOLDEMIKAEL, 2019; OKORHI *et al.*, 2019).

Estudos realizados em OP e Instituições de Educação Superior (IES) reforçam o fato desses locais serem potenciais geradores de REEE (KUMAR; RAWAT, 2018; OKORHI *et al.*, 2019), pois participam direta e/ou ativamente de processos tecnológicos (MAPHOSA *et al.*, 2022).

2. Metodologia

A busca sistemática limitou-se ao tipo de fonte “periódico” e o tipo de documento “artigo” e considerou publicações a partir de 2009, pois considerando apenas os artigos recentes (últimos cinco anos), o retorno foi escasso com apenas 3 artigos que satisfaziam a pergunta: “A gestão ou o gerenciamento de REEE de origem governamental é abordada?”.

O diagnóstico de geração e manejo de REEE de origem governamental foi realizado por meio de um estudo de caso que envolveu pesquisa documental e de campo, conforme detalhado a seguir.

2.1. Estudo de caso: Espírito santo

No Estado do Espírito Santo, segundo dados de 2018, o funcionalismo na administração pública, defesa e seguridade social somavam 165.964 indivíduos, ficando na 16ª posição nacional (IBGE, 2022).

Conforme site oficial do Governo, o ES possui no poder executivo um total de 54 OP, sendo 23 secretarias, 26 autarquias e cinco empresas públicas, com filiais e escritórios em cada um dos 78 municípios que compõem o Estado (GOVERNO ES, 2021). Devido à acessibilidade dos dados, foi escolhido como objeto do estudo os ETIC adquiridos e os RETIC gerados nos OP do Estado do Espírito Santo que possuía 61.227



funcionários no poder executivo estadual até dezembro de 2022 (PORTAL DA TRANSPARÊNCIA, 2023).

A Secretaria de Estado da Educação (SEDU) é responsável por 433 escolas, 11 Superintendências Regionais de Educação (SRE), a Faculdade de Música do Espírito Santo (FAMES) e o Conselho Estadual de Educação (CEE), totalizando 447 unidades (SEDU, 2023), bem como 271.731 estudantes (TCEES, 2021), e 21.435 servidores nos quadros de atuação do magistério, efetivos, designação temporária e administrativo (PORTAL DA TRANSPARÊNCIA, 2023). A SEDU é o órgão público que mais movimenta ETIC no Estado do Espírito Santo.

Apesar de adotar o ES para o estudo de caso, como os OP estão submetidas às mesmas legislações, os resultados obtidos aproximam-se em amostragem do que ocorre com os REEE nas instituições de direito público brasileiras.

2.2. Pesquisa documental

A secretaria de gestão responsável pelos bens governamentais forneceu quatro bases de dados contendo informações sobre os bens móveis de ETIC adquiridos no período de 2010 a 2022; e RETIC transferidos, doados e baixados no período de 2014 a 2022. Os dados foram fornecidos pela SEGER, responsável pelo aplicativo Sistema Integrado de Gestão Administrativa (SIGA) que registra as movimentações destes ativos patrimoniais. Em seus quatro primeiros anos foram registradas as bases de dados dos bens móveis ativos e aquisições realizadas pelos OP. A partir do ano de 2014 passou-se a registrar no SIGA as transferências, doações e baixas de bens móveis desses OP.

O cadastro de ativos não possui uniformidade nas descrições, o que demonstra uma maior preocupação com o cadastro da aquisição do que em registrar informações precisas que contribuam com o tratamento de dados para gestão dos RETIC. Devido à essa heterogeneidade das descrições, oito categorias foram criadas para agrupar dispositivos com características semelhantes.

Não foi possível identificar o quantitativo de monitores CRT e LCD nas bases de dados apresentadas, no entanto, os monitores do tipo CRT não são comuns em OP. Ainda, a terceirização do serviço de impressão e insumos retirou do governo a obrigatoriedade do tratamento destes equipamentos quando inservíveis, bem como dos cartuchos com tintas residuais e toners usados. As aquisições de multifuncionais eventualmente ocorrem para atender as demandas de OP mais afastadas dos grandes centros, uma vez que nem sempre há interesse das terceirizadas do serviço de impressão para regiões distantes de seus centros urbanos.

Também foi levantado o quantitativo de funcionários públicos ativos dos OP no Estado do Espírito Santo no período de 2014 a 2022, segundo os dados disponibilizados pela PORTAL DA TRANSPARÊNCIA (2023) calculando-se a média de 61.002 funcionários/ano. O objetivo do levantamento foi permitir o cálculo posterior de geração *per capita*.



2.3. Tratamento dos dados

Os registros de aquisição de equipamentos começaram em 2010, mas incluem bens móveis desde 2005. Como primeiro refinamento, foi incluído em cada arquivo os indicadores "aquisição", "transferência", "doação" e "baixa" para mapear a origem dos dados e permitir a comparação. Como as descrições dos ativos não são padronizadas, outro filtro foi aplicado classificando-os como "acessórios", "*desktops*", "monitores", "multifuncionais", "*notebooks*", "óptico", "roteadores", "servidores", "*tablets*", "*workstations*" e "outros".

Na revisão seguinte, foram eliminados 2066 itens classificados como "óptico" que correspondem a um projeto específico, e ao final do seu ciclo de vida, como operavam integrados, o conjunto todo foi baixado e leiloado. Os itens categorizados como "outros" compunham um conjunto de ferramentas e mobiliários que foram erroneamente incluídos em EEE. Esta pesquisa manteve todos os tipos de EEE que apresentaram a quantidade de ativos igual ou superior a um item.

O SIGA atual foi implantado em 2010 e gradualmente as agências foram sendo migradas para o novo sistema de gestão administrativa. A carga inicial de dados era composta apenas pelas informações dos bens que estavam em uso. Verificou-se que as primeiras baixas neste sistema iniciaram em 2014. Não se obteve acesso aos dados do sistema de gestão administrativa anterior chamado ÀGORA.

Dentre os EEE, os eletrodomésticos de grande e pequeno porte, equipamentos de consumo e esportes, lâmpadas, ferramentas elétricas, dispositivos médicos, inclusos na classificação de Forti *et al.* (2020), e que apesar de comporem o parque tecnológico das agências, não tiveram seus dados solicitados por não serem objeto desta pesquisa, que focou apenas em ETIC.

Devido à falta de padronização na descrição dos EEE na base de dados dos OP, nove categorias de ETIC foram estabelecidos, conforme segue. Os dispositivos que auxiliam ou ampliam o funcionamento dos ETIC, tais como discos rígidos, *kit* multimídia, memórias, câmeras, estabilizadores, rádios, *no-breaks*, *racks*, transceptores compactos do tipo Small Form-Factor Pluggable (SFP) ou Gigabit Interfaces Converter (GBIC), *patch panels*, placas de rede ou Wireless Fidelity (*wifi*), foram agrupados como acessórios. Na categoria acessórios foram agrupados discos rígidos, *kit* multimídia, memórias, câmeras, estabilizadores, rádios, *no-breaks*, *racks*, transceptores compactos do tipo SFP ou GBIC, *patch panels*, placas de rede ou *wifi*. Em *notebooks* constam os portáteis que possuem, em equipamento único, unidade central de processamento (CPU do acrônimo em inglês *Central Processing Unit*), monitor, teclado e *mouse*; neste grupo foram incluídos os *laptops*, *netbooks*, *chromebooks*, *ultrabooks* e *macbooks*.

Os portáteis que possuem tela sensível ao toque e CPU integrados, incluindo os *iPads* e celulares, foram organizados em um grupo específico chamado *tablets*. Os computadores de grande porte, ou seja, com elevada capacidade de processamento e armazenamento como as *blades* e *tape data* ou *HD storage*, foram classificados como servidores.

Nos roteadores foram agrupados os equipamentos comutadores de rede como *switches*, *routers*, *access points* e KVMs. Nas multifuncionais foram englobados as copiadoras, *scanners*, digitalizadores com ou sem impressoras *laser*, jato de tinta, matricial e *plotters*. As telas do tipo *Cathode Ray Tube* (CRT), *Liquid Crystal Display*



(LCD), *Light Emitting Diode* (LED), projetores, quadros digitais e telas de projeção foram classificadas como monitores.

As áreas de controle de bens dos OP, na maioria das vezes, separavam o monitor e o computador, chamando-o de CPU, gabinete ou *desktop*. Os *mouses* e teclados raramente eram patrimoniados, porém faziam parte do que consideravam *desktop*. Sendo assim, neste estudo, ao conjunto composto de *monitor*, *desktop*, teclado e *mouse* foi atribuído o nome de *workstation*. Foram incluídos neste grupo os modelos *all-in-one* – literalmente “tudo-em-um”, sendo este um equipamento que integra CPU e monitor, e são entregues com teclado e mouse. Esta pesquisa focou na geração de RETIC, em especial computadores (*notebooks*, *desktops*, *all-in-one*) e seus periféricos tais como telas, multifuncionais, servidores, roteadores e *switches* de rede dentre outros, por serem os EEE mais utilizados nestes OP.

2.4. Pesquisas de campo

De forma complementar foram realizadas pesquisas de campo com dois objetivos: (i) mapear a gestão e o gerenciamento do REEE de origem governamental e (ii) conhecer um centro de referência de manejo de REEE de origem governamental.

O mapeamento da gestão e do gerenciamento do REEE de origem governamental no ES foi realizado por meio de visita *in loco* a todos os 54 OP e das filiais associadas em várias cidades do Estado para vistoria pré-conexão e posteriormente auditorias dos ETIC permutados. As vistorias nos OP possibilitaram acompanhar a recepção de ETIC adquiridos e acúmulo temporário de RETIC nas substituições de parques tecnológicos.

As interações com os gestores públicos foram realizadas em um ambiente informal, sem registro de falas ou uso de questionários. O registro fotográfico do galpão central e dos OP incluídos na Figura 1 foi realizado em setembro de 2020, quando o estudo foi iniciado.

O Centro de Descarte e Reuso de Resíduos de Informática (CEDIR), que já atua no manejo de REEE da Universidade de São Paulo, de seus professores, alunos e comunidade no entorno, funciona desde 2009, inclusive com projetos sociais de inclusão digital (MORALES, 2014). Foi realizada uma visita técnica no mês de outubro de 2022 ao CEDIR com o objetivo de compreender a dinâmica do manejo dado aos RETIC recebidos.

3. Resultados e Discussão

3.1. Manejo do REEE de origem governamental no Espírito Santo

Todas os OP possuem um setor responsável pela gestão dos bens móveis, inclusive EEE. Normalmente, o gerenciamento de REEE nos OP, não prevê uma área para reparo e manutenção de bens inservíveis gerados, sendo os mesmos armazenados e depois destinados para o galpão de bens inservíveis do Estado.

Em cada OP há um setor para operacionalização dos ETIC. Quando há necessidade de recolhimento destes, por problemas ou substituição por renovação, este setor é acionado através de ordem de serviço ou e-mail. Os ETIC em condições de uso podem ser redistribuídos internamente. É neste momento que, se outros OP



manifestarem interesse, os ETIC podem ser transferidos ou doados para instituições de interesse público.

A transferência de equipamentos entre OP é uma alternativa quando há necessidade de ETIC modestos, ou seja, que demandam uso de aplicações mais simples ou menor capacidade de processamento de dados. Sendo demorado o processo licitatório de aquisição de ETIC, algumas agências recorrem a outras em busca de ETIC funcionais armazenados. Esta movimentação estende a vida útil de ETIC contribuindo para a redução de novas aquisições.

Os ETIC obsoletos ou avariados são armazenados temporariamente nos OP e até duas vezes ao ano, são relacionados pelo setor de controle de bens móveis, classificados como bens inservíveis, desincorporados do seu ativo fixo, ocasião em que ocorre a baixa patrimonial. Após esta baixa, os RETIC são encaminhados para o galpão central da SEGER, responsável pela gestão dos bens móveis inservíveis.

Na Figura 1 temos o galpão central e algumas salas em OP que são utilizadas para armazenamento temporário de REEE no ES.

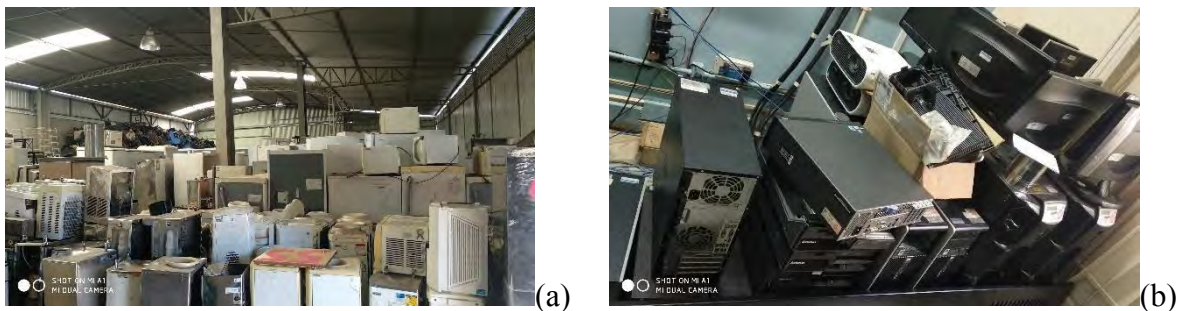


Figura 1 – Galpão central (a) e sala (b) em órgão público do ES com RETIC armazenados

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Figura 1, nos OP, os armazenamentos não são organizados e estão localizados em salas afastadas para minimizar interferências ambientais e de insetos. Já no galpão central, os bens móveis inservíveis são separados em lotes por tipo de resíduos, mas não por estado de funcionamento. Este local, apesar de coberto, é propenso a insetos, vento e umidade do ar, principalmente em dias chuvosos. Em ambos os locais, o arranjo dos ETIC dificulta seu gerenciamento e por ocorrer de forma inadequada minimiza o potencial de reutilização e pode até danificá-los.

A maior dificuldade, de acordo com os gestores públicos, é a falta de infraestrutura para classificar e armazenar os RETIC, bem como a falta de pessoal para executar esse serviço. Além disso, o armazenamento, tanto internamente nos OP como no galpão central, pode resultar em danos e inviabilizar o reaproveitamento dos RETIC.

Com a chegada de diversos REEE no galpão central, ocorre uma separação por tipos de equipamentos em lotes de sucatas, com a intenção de atrair compradores pelo volume. Ou seja, são formadas pilhas de celulares, equipamentos hospitalares, *desktops*, *notebooks*, monitores, *tablets*, dentre outros. Por ano, ocorrem até dois leilões e a SEGER contrata uma empresa ou pessoa especializada em leilões que se encarrega de



fazer a divulgação dos bens móveis disponíveis e cadastro dos interessados em proporcionar lances *online* pelos lotes.

Com base no manejo do REEE de origem governamental acima relatado pode-se inferir que as fontes de geração e o fluxo do descarte de REEE no ES não diferem muito dos outros Estados da federação. No entanto, a quantidade gerada é proporcional ao número de funcionários, usuários e OP, variando em cada Estado. A seguir apresentamos o diagnóstico de geração de RETIC no ES, que possibilita calcular a contribuição média individual por ano dos funcionários públicos.

3.2. Diagnóstico de geração de RETIC

O gerenciamento de bens móveis envolve trabalhar com outras baixas menos comuns, mas não inexistentes. Do total de 31.299 unidades de RETIC com a rubrica de patrimônios baixados, 120 unidades tiveram destinações diferentes das abordadas nesta pesquisa. A seguir apresentamos estas destinações da seguinte forma: quantidade, rubrica e porcentagem que representa no montante: 71 extravios (0,22%); 34 furtos (0,10%); dez roubos (0,03%); e cinco acidentes (0,02%), totalizando 0,37% do montante. Desta forma esta pesquisa utilizou as rubricas Destruição por Uso (Sucata) e Inservível Irrecuperável (Sucata), com o título de baixa, uma vez que efetivamente vão para leilão e somam 31.179 unidades de RETIC.

Do total de 263.981 ETIC adquiridos pelo Governo do ES no período de 2010 a 2022, a Secretaria de Estado de Educação é a maior compradora, sendo responsável por 55% dos ativos no período. É também a que mais adquiriu *tablets* (91%) e *notebooks* (90%) para uso dos estudantes e roteadores (37%) para as escolas, indicando que a mobilidade digital é uma prioridade no ambiente escolar.

Através da base de dados do SIGA (2023) obteve-se as seguintes médias anuais nas movimentações de ETIC e RETIC da SEDU: entradas: 11.124 unidades; transferência: 452 unidades; baixas: 2.212 unidades; e doação: 319 unidades. Devido a programas de inclusão digital, cabe sabientar que vários ETIC foram adquiridos para uso exclusivo dos estudantes. A seguir apresentamos os períodos e quantidades: adquiridos em 2013 (2.361 *tablets* e 1.468 *netbooks*), 2014 (7.272 *tablets*), e *chromebooks* em 2018 (1.080 unidades), 2019 (4.066 unidades), 2020 (59 unidades), 2021 (60.138 unidades) e 2022 (2.389 unidades). Desta forma devemos considerar a retirar do montante de entrada ficando desta forma a média de 5.060 unidades/ano para uso dos funcionários da SEDU.

Cabe salientar que a SEDU começou a usar o módulo de baixa de bens móveis a partir de 2018. Portanto, para mensurar o quantitativo de ETIC baixados, doações e transferências, foi utilizada uma média aritmética de cada movimentação, com base nas quantidades de ETIC por ano, para os quais os dados foram fornecidos.

As movimentações de ETIC e RETIC das 53 OP do ES (exceto SEDU), no período de 2010 a 2022, tiveram as seguintes médias anuais: entradas: 9.182 unidades; transferências: 2.069 unidades; baixas: 2.236 unidades; e doações: 363 unidades (SIGA, 2023).

Por fim, a Tabela 1 apresenta a média das movimentações de todos os OP do Governo do ES.



	Média SEDU	Média demais AG	Média Total
Entrada	11.124	9.182	20.306
Entrada *	5.060	9.182	14.242
Transferência	452	2.069	2.521
Baixa	2.212	2.236	4.448
Doação	319	363	682

Tabela 1 – Movimentação de ETIC e RETIC dos OP do ES (em unidade/ano)

Fonte: SIGA (2023); * retirada de aquisições de portáteis educacionais de uso exclusivo dos estudantes.

Para mensurar o quantitativo de ETIC da SEDU, utilizados na Sede e demais unidades vinculadas à educação (escolas, SRE, CEE e FAMES), foi necessário considerar o legado de equipamentos adquiridos nos anos anteriores. Com base nos estudos de Olaniyan *et al.* (2020), uma estação de trabalho do tipo *desktop* tem vida útil média de cinco anos. Dessa forma, foram calculados o total de ETIC para no ano de 2022 com base nas informações da Tabela 2.

	ID da variável	Unidade	SEDU	Demais OP
Média vida útil desktop	A	ano/unidade		5,0 ^{*1}
Média aquisição ETIC	B	unidade/ano	5.060	9.182
Média transferências ETIC	C	unidade/ano	452	2.069
Média doação RETIC	D	unidade/ano	319	363
Média baixa RETIC	E	unidade/ano	2.212	2.236

Tabela 2 – Distribuição média de ETIC para SEDU e OP no ano de 2022

Fonte: (SIGA, 2023); ^{*1} Olaniyan *et al.* (2020). Legenda: ID – Identificador.

O quantitativo de ETIC das OP, SEDU e filiais vinculadas foi obtido com base na Equação 1: $((A * B) + C) - (D + E)$

Desta forma obtemos o montante de 23.221 ETIC vinculados a SEDU e suas unidades no ano de 2022, e 45.380 ETIC vinculados aos 53 OP do Governo do Estado do ES em média.

Devido à dinâmica peculiar da SEDU, que envolve unidades escolares, ETIC de uso exclusivo por alunos, equipamentos compartilhados entre servidores e estudantes, os dados das demais secretarias foram tratados separadamente dos dados da SEDU, na busca de índices de ETIC e RETIC para o Governo do ES.

As doações possuem uma média de 682 RETIC/ano e apresentam baixa variação ao longo dos anos. As transferências de ETIC para outros OP têm uma média de 2.521 ETIC/ano com forte aumento em 2022 registrando o reuso de 6.516 unidades.

Com o objetivo de mensurar o quantitativo de RETIC gerado pelo Governo do Espírito Santo, foram adotadas as unidades de ETIC que sofreram baixa patrimonial e consequentemente foram leiloados no período de 2014 a 2022. De posse dessas informações, foi possível calcular o peso total da amostragem no período citado e que foi utilizado como valor médio do quilo do REEE apresentado por Forti *et al.* (2020) para calcular o valor total da amostragem.

Para o cálculo das massas em quilogramas foram consultadas os estudos de Kaloki (2014), Panizzon (2014), Dalgo *et al.* (2015), Gomes *et al.* (2017) e Olaniyan *et al.* (2020). Quando apresentado mais de um valor por categoria, foram considerados os mais atuais. Desta forma obteve-se o seguinte resultado para este estudo: *Desktops*: 8,0



kg; Monitores CRT: 11,0 kg; Monitores LCD: 4,0 kg; Multifuncionais: 6,3 kg; *Notebooks*: 2,4 kg; Acessórios: 6,0 kg; Roteadores: 2,0 kg; *Workstations*: 25,0 kg; *Tablets*: 0,7 kg; Servidores: 9,9 kg. Utilizaremos a massa de 7,5 kg para os monitores sendo este valor a média dos monitores CRT e LCD; e no caso das *workstations* foi considerado o peso da CPU com monitor.

Conforme os já citados quantitativos de RETIC da SEDU que foram leiloados no período de 2018 a 2022 e o RETIC leiloados dos demais OP no período de 2014 a 2022, e o peso médio de cada categoria supracitado no parágrafo anterior foi possível calcular a massa total de RETIC gerada nos períodos supracitados conforme consta na Tabela 3.

Categorias	Peso Médio de EEE (kg)	Unidades RETIC demais OP * ¹	Peso Total (kg)	Unidades RETIC SEDU * ²	Peso Total (kg)
<i>Desktops</i>	8,0	7.532	60.256,0	3.910	31.280,0
Monitores	7,5	6.323	47.422,5	3.700	27.750,0
Multifuncionais	6,3	2.541	16.008,3	703	4.428,9
<i>Notebooks</i>	2,4	778	1.867,2	1655	3.972,0
Acessórios	6,0	948	5.688,0	28	168,0
Roteadores	2,0	909	1.818,0	119	238,0
<i>Workstations</i>	25,0	743	18.575,0	18	450,0
<i>Tablets</i>	0,7	77	53,9	901	630,7
Servidores	9,9	269	2.663,1	25	247,5
		Total	154.352,0	Total	69.165,1

Tabela 3 – Indicadores de geração de RETIC nos OP e SEDU
Fonte: SIGA, 2023; *¹ Período de 2014 a 2022; *² Período de 2018 a 2022.

A Tabela 4 apresenta uma proposta de média de geração de RETIC nos OP do Estado do Espírito Santo com base na média de funcionários públicos dos OP e SEDU e a massa (em kg) constante na Tabela 3, que possui diversidade de ETIC, diferentemente do encontrado nas literaturas que apresentam os equipamentos mais comuns, respeitando as particularidades da SEDU, que possuem maior número de servidores públicos vinculados e com dados de 2018 a 2022, e demais OP que possuem dados de 2014 a 2022.

Para obter a massa da média anual de geração de RETIC foi aplicado a divisão da massa de RETIC pelo número de anos do período analisado. Para a obtenção da massa da média anual de geração de RETIC por funcionário público foi aplicado a divisão da massa da média anual de geração de RETIC pela média anual de funcionários dos OP. Por fim, as médias de geração foram somadas obtendo o montante de geração anual de RETIC no ES e por funcionário no Estado.

	OP	SEDU	Totais
Massa RETIC (em kg) * ¹	154.352,0	69.165,1	-
Anos da amostra (em unidades) * ¹	9	5	-
Média da geração RETIC (em kg/ano)	17.150,2	13.833,0	30.983,2
Média de funcionários (em unidades)	37.738	23.236	-
Média da geração RETIC por funcionário público (em kg/ano)	0,454	0,596	1,050



Tabela 4 – Geração de RETIC no Estado do Espírito Santo
Fonte: SIGA (2023); PORTAL DA TRANSPARÊNCIA (2023); *1 Tabela 3.

Importante ressaltar que a análise realizada permite dimensionar o montante de RETIC de origem governamental gerado para todo o Brasil. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada IPEA (2023) a média de funcionários públicos do Brasil no período de 2010 a 2019 foi de 11.180.170 indivíduos.

4. Considerações Finais

Constatou-se que o Estado do Espírito Santo gera cerca de 31,0 t/ano de RETIC, sendo 17,2 t/ano no ambiente educacional e 13,8 t/ano consolidando as demais secretarias. Foi calculado também a geração média por funcionário público estadual se obtendo o valor de 1,05 kg/ano. A partir do estudo de caso do ES, pode-se inferir que a geração média de RETIC na totalidade de órgãos públicos brasileiros é de 11,7 kt/ano. Trazer à tona a necessidade de gerenciamento do RETIC em OP é imperativo e o envolvimento dos servidores e gestores públicos pode contribuir para minimizar a geração deste resíduo.

Agradecimentos

Esta pesquisa foi apoiada pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), Processo nº 83757392/2018.

Referências

BRASIL. **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 Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto Federal 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. Brasília, 2020. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/d10240.htm.

BRASIL. **Lei Federal nº 14.133, de 1º de abril de 2021.** Lei de Licitações e Contratos Administrativos. Brasília, 2021. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/lei/L14133.htm.

DALGO, Denisse; OCHOA-HERRERA, Valeria de Lourdes; PÉREZ, Gabriela; NARVÁEZ, René Parra; PEÑAFIEL, Ródney David; SÁENZ, Mateo; VELASCO, Alexandra. **Campaña de Reciclaje de Residuos Electrónicos en la Universidad San Francisco de Quito.** ACI Avances en Ciencias e Ingenierías, [s. l.], v. 7, n. 2, 2015.

FORTI, Vanessa; BALDÉ, Cornelis Peter; KUEHR, Ruediger; BEL, Garam. **The Global e-Waste Monitor 2020.** [S. l.: s. n.], 2020. *E-book*. Disponível em: <http://ewastemonitor.info/>.



GOMES, Andressa S. T.; SOUZA, Luiza A.; YAMANE, Luciana H.; SIMAN, Renato R. **Quantification of E-Waste : A Case Study in Federal**. Int J Environ Ecol Eng, [s. l.], v. 11, n. 2, p. 195–203, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1129099>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Portal Cidades@**. Brasil. 2022. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/panorama>.

KALOKI, N. **An Assessment Of Existing E-Waste Management Systems In Institutions Of Learning In Ruiru Subcounty, Kiambu County**. Dissertação de Mestrado. Kenyatta University. Quênia. 2014.

KITILA, A. W.; WOLDEMIKAEL, S. M. **Waste electrical and electronic equipment management in the educational institutions and governmental sector offices of Addis Ababa, Ethiopia**. Waste Management, [s. l.], v. 85, p. 30–41, 2019.

KUMAR, S.; RAWAT, S. **Future e-Waste: Standardisation for reliable assessment**. Government Information Quarterly, [s. l.], v. 35, n. 4, p. S33–S42, 2018. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/386293f9ba90ce4904cd4c575ea7ae392d695928>. Acesso em: 16 jun. 2021.

MAPHOSA, Vusumuzi; MACHERERA, Margaret; ZEZAI, David; MANGWANA, Jasper. **E-Waste Awareness And Practices Of Zimbabwean University Students A Descriptive Study**. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, Vol.100, n. 18, p.5409-5418, 30 Set 2022. Disponível em: <http://www.jatit.org/volumes/Vol100No18/33Vol100No18.pdf>.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Ministério do Meio Ambiente celebra Acordo Setorial de Eletroeletrônicos**. Publicado em 31/10/2019. Atualizado em 31/10/2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/ministerio-do-meio-ambiente-celebra-acordo-setorial-de-eletroeletronicos>. Acessado em: 07/04/2023.

MORALES, Lúcia Lucena. **Gestão do resíduo eletrônico na Universidade: estudo de caso no centro de descarte e reuso de resíduos de informática (CEDIR) USP**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental – Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 1–110, 2014.

OKORHI, Johnson Ojiyovwi; AMADI-ECHENDU, Joe E.; ADEREMI, Helen Olubunmi; UHUNMWANGHO, Roland; OKWUBUNNE, Anthony Chukwudi. **Disconnect between policy and practice in developing countries: Evidence of managing e-waste from Nigeria**. African Journal of Science, Technology, Innovation and Development, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 523–531, 2019. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/c96f94ee279ca269994dad712fd27aeac9feb7db>.



OLANIYAN, O.S.; AYINDE, R.B.; ADEOTI, A.O.; ALABI, A.J. **Electronic Waste Characterization and Management (Generation and Computation) in Ladoke Akintola University of Technology Main Campus.** Journal of Environmental Engineering and its Scope. V.3 I.1. p.1-7. 2020.

OPARA, A. **Development of an Integrated Sustainable Electronic Waste Management System for Higher Institutions in Rivers State.** RA Journal of Applied Research, [s. l.], v. 06, n. 12, p. 2763–2786, 2020.

TCEES - TRIBUNAL DE CONTAS DO ESTADO DO ESPÍRITO SANTO - PAINEL DE CONTROLE. **Distribuição de escolas públicas, matrículas e profissionais da educação no Estado e nos municípios.** 2021. Disponível em: <https://paineldecontrole.tcees.tc.br/areasTematicas/Educacao-VisaoGeral>. Acesso em 21 abr. 2023.

PANIZZON, T. **Avaliação da Geração de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEES) em uma Universidade Comunitária.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul. 2014. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/handle/11338/935>

SECONT - SECRETARIA DE ESTADO DE CONTROLE E TRANSPARÊNCIA (Espírito Santo). PORTAL DA TRANSPARÊNCIA. Disponível em <https://transparencia.es.gov.br/pessoal>. Acesso em 21 abr. 2023.

SEDU - SECRETARIA DE ESTADO DA EDUCAÇÃO (Espírito Santo). **Censo Escolar - Matrículas.** disponível em <https://educacao.sedu.es.gov.br/dados-educacionais>. Acesso em 07 maio 2023.

SEGER - SECRETARIA DE ESTADO DE GESTÃO E RECURSOS HUMANOS (Espírito Santo). Norma de Procedimento - SCL Nº 001. **Padronizar os processos de compra de bens e contratação de serviços comuns por meio da modalidade licitatória Pregão.** Ver.04. 2020.

SIGA - SISTEMA INTEGRADO DE GESTÃO ADMINISTRATIVA - SECRETARIA DE ESTADO DE GESTÃO E RECURSOS HUMANOS (Espírito Santo). **Base de dados de movimentação de bens móveis do Governo do Estado do Espírito Santo do período de 2010 a 2022.** Espírito Santo. 2023.



VI Seminário Internacional sobre Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

ANAIS

9 a 11 de outubro de 2023
Rio de Janeiro, Brasil



REALIZAÇÃO



ORGANIZAÇÕES CONFIRMADAS



Meio Ambiente, Infraestrutura e Logística

Secretaria de



SÃO PAULO
GOVERNO DO ESTADO

MINISTÉRIO DO
DESENVOLVIMENTO,
INDÚSTRIA, COMÉRCIO
E SERVIÇOS

MINISTÉRIO DE
MINAS E ENERGIA

MINISTÉRIO DO
MEIO AMBIENTE E
MUDANÇA DO CLIMA

MINISTÉRIO DAS
COMUNICAÇÕES



PATROCINADORES



REALIZAÇÃO



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÃO

