

MINERAÇÃO URBANA

Conceitos e análise do potencial dos
resíduos eletroeletrônicos

Lúcia Helena Xavier
Marianna Ottoni (Org.)



MINERAÇÃO URBANA

Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos

Como referenciar este livro:

Xavier, L.H., Ottoni, M. (org). **Mineração Urbana: Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos**. 1^a ed. Rio de Janeiro. Centro de Tecnologia Mineral, CETEM/MCTI. 2021.

Copyright © 2021 CETEM/MCTI

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
Constitui violação de copyright (Lei 5.988).

MINERAÇÃO URBANA

Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos

ORGANIZAÇÃO E EDITORAÇÃO

Lúcia Helena Xavier

Marianna Otoni

REVISÃO

Carla Carvalho Alves

FOTO DA CAPA

Ben O'bro

<https://unsplash.com/photos/wpU4veNGnHg>

APOIO

CNPq Encomenda – Projeto Nº 400555/2020-4

Informações:

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Homepage: www.cetem.gov.br

CIP – Catalogação na Publicação

X3

Xavier, Lúcia Helena

Mineração urbana: conceitos e análise do potencial dos resíduos
eletroeletrônicos / Lúcia Helena Xavier, Marianna Otoni __Rio de Janeiro:
CETEM/MCTI, 2021.

197p.

ISBN 978-65-5919-059-1

1. Economia circular. 2. Mineração urbana. 3. Resíduos eletroeletrônicos.
I. Centro de Tecnologia Mineral. II. Otoni, Marianna. III. Título

CDD 628.445

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI

Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 - 5849

PREFÁCIO

É com imenso prazer que apresento à comunidade técnico-científica, empresarial e Governamental o livro MINERAÇÃO URBANA: Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos.

O consumo de equipamentos eletroeletrônicos, largamente demandados pela sociedade moderna, sofreu forte intensificação nos últimos dois anos, em que o mundo foi assolado pela pandemia da Covid-19, que nos impôs novas modalidades de trabalho, produção e comunicação. Porém, as matérias-primas necessária à produção destes bens de consumo derivam, em grande parte, da indústria extrativa mineral, setor que tem como peculiaridades a diversidade das jazidas minerais, fatores geográficos e políticos, além dos desafios tecnológicos para a extração dos bens minerais a partir de recursos finitos e cada vez mais escassos.

Da mesma forma em que se tem o aumento da demanda por equipamentos eletroeletrônicos novos, tem-se um aumento considerável da quantidade destes equipamentos pós-consumo aptos para o descarte, para fins de reuso, condicionamento, remanufatura, reciclagem ou outros destinos. Entretanto, a viabilidade da aplicação prática do conceito dos 3R's da sustentabilidade – reduzir, reutilizar, reciclar - depende, fortemente, de um trabalho de informação e conscientização da sociedade para o descarte adequado dessa categoria de produtos pós-consumo ou resíduos.

A experiência de mais de uma década na condução de estudos no segmento de gestão de resíduos eletroeletrônicos, permitiu à equipe de pesquisa do projeto R3MINARE, sob a coordenação da pesquisadora Lúcia Helena Xavier e em colaboração com especialistas de instituições tecnológicas e empresas brasileiras, apresentar à sociedade uma abordagem dos principais assuntos que permeiam a gestão circular e sustentável dos resíduos eletroeletrônicos, buscando analisar o potencial de recuperação de materiais como alternativa ao suprimento das demandas por recursos naturais.

Na Parte I deste livro são apresentados os conceitos da mineração urbana, uma comparação entre mineração primária e mineração secundária e o entendimento dos processos que deverão apoiar as mudanças nos modos de produção e consumo da sociedade, rumo à consolidação de uma economia de baixo carbono. Ainda nesta primeira parte, a possibilidade de uso dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, por meio da sua reinserção na cadeia produtiva e na cadeia de valor, é abordada com base nos preceitos da economia circular. De maneira oportuna, encerra-se esta parte do livro com uma avaliação da legislação brasileira – avanços e entraves - para a gestão de resíduos eletroeletrônicos.

Na Parte II foi abordado o potencial dos resíduos eletroeletrônicos, a implantação de sistemas de logística reversa e a gestão circular destes resíduos, por meio do uso de ferramentas como geoprocessamento e sistemas informatizados, visando atender às demandas por matérias-primas críticas. Estima-se que, de 2008 a 2019, a geração média per capita de resíduos eletroeletrônicos no Brasil cresceu de 3,8 para 10,2 kg/hab/ano, evidenciando o grande potencial deste segmento. Finalmente, na Parte III são apresentados estudos de caso, referentes às empresas parceiras deste projeto, reforçando a necessidade de esforços de todos os atores envolvidos – Governo, setor produtivo e sociedade – na consolidação das práticas de economia circular para uma sociedade mais sustentável.

Silvia Cristina Alves França

Diretora do CETEM

SUMÁRIO

PARTE I - Apresentando os conceitos.....	7
Introdução	8
CAPÍTULO 1. A mineração urbana e a transição para uma nova economia.....	10
1.1. Um recomeço para a economia global.....	11
1.2. Pós-pandemia e oportunidades de circularidade	14
1.3. Aspectos geográficos e econômicos	16
1.4. Conclusões.....	19
Referências	20
CAPÍTULO 2. Mineração Primária e Mineração Secundária: Uma breve análise comparativa na cadeia reversa dos eletroeletrônicos.....	21
2.1. Introdução.....	22
2.2. Mineração no Brasil.....	23
2.3. Mineração primária e seus impactos.....	24
2.4. Mineração secundária de REEE e seus impactos.....	25
2.5. Mineração primária versus mineração secundária.....	28
2.6. Conclusões.....	30
Referências	30
CAPÍTULO 3. Mineração urbana: Estado da arte e perspectivas	33
3.1. Introdução.....	34
3.2. Análise do fluxo de materiais.....	35
3.3. Identificação e recuperação de matéria-prima	37
3.3.1. Definições e estudos sobre mineração urbana.....	38
3.3.2. Técnicas para a recuperação de materiais	39
3.4. Mineração urbana de materiais críticos	40
3.5. Conclusões.....	42
Referências	43
CAPÍTULO 4. Oportunidades e desafios da mineração urbana de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos	46
4.1. Introdução.....	47
4.2. Impacto da mineração e uma breve análise da regulamentação.....	47
4.3. Mineração urbana de REEE.....	49
4.4. Aspectos socioambientais da mineração urbana	53
4.5. Conclusões.....	54
Referências	54

CAPÍTULO 5. Economia Circular e a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos	57
5.1. A agenda 2030 e o recomeço econômico	58
5.2. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e a agenda 2030	62
5.3. Conclusões.....	64
Referências	65
CAPÍTULO 6. Gestão de resíduos eletroeletrônicos: Evolução da legislação brasileira e desafios para uma governança sustentável e circular	67
6.1. Introdução	68
6.2. Evolução da regulamentação brasileira para REEE	69
6.3. Desafios para uma governança sustentável e circular de REEE no Brasil	74
6.4. Conclusões.....	76
Referências	77
PARTE II - Análise do Potencial dos Resíduos Eletroeletrônicos.....	80
CAPÍTULO 7. A implementação dos Sistemas de Logística Reversa de REEE no Brasil	81
7.1. Introdução	82
7.2. Lâmpadas.....	83
7.3. Eletroeletrônicos.....	84
7.4. Pilhas e baterias.....	86
7.5. Panorama geral	88
7.6. Conclusões.....	92
Referências	93
CAPÍTULO 8. Gestão circular de resíduos eletroeletrônicos nas organizações.....	97
8.1. Introdução	98
8.2. Modelos de gestão circular de REEE nas organizações	98
8.3. Desafios na gestão e destinações possíveis para REEE nas organizações.....	101
8.4. Conclusões.....	104
Referências	105
CAPÍTULO 9. Geoprocessamento na gestão de resíduos eletroeletrônicos no Brasil	106
9.1. Introdução	107
9.2. Georreferenciamento na gestão de REEE	107
9.3. Conclusões.....	112
Referências	113
CAPÍTULO 10. Sistemas informatizados para a gestão de REEE.....	116
10.1. Introdução	117
10.2. Sistemas informatizados e a gestão de resíduos.....	118
10.2.1. O sistema nacional de informações sobre resíduos (SINIR)	121
10.3. Identificação e análise de sistemas para a gestão de resíduos.....	122

10.3.1. Sistemas informatizados em plataforma Web	123
10.3.2. Sistemas informatizados para dispositivos móveis	125
10.4. Conclusões	127
Referências	128
CAPÍTULO 11. Materiais críticos e a gestão de resíduos eletroeletrônicos	130
11.1. Introdução	131
11.2. Materiais críticos	132
11.3. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos	137
11.4. Reciclabilidade de materiais críticos em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos	139
11.5. Conclusões	140
Referências	140
CAPÍTULO 12. Indicadores para a gestão de REEE	144
12.1. Introdução	145
12.2. Desafios da gestão de REEE	146
12.3. Indicadores para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos	148
12.3.1. Potencial de risco	148
12.3.2. Categorias de REEE	149
12.3.3. Indicadores de performance	152
12.3.4. Projetos de rastreabilidade	154
12.3.5. Estimativa da geração de REEE	154
12.4. Conclusões	159
Referências	159
CAPÍTULO 13. Lâmpadas de LED: legislação, caracterização e recuperação de metais	163
13.1. Introdução	164
13.2. Legislação mundial sobre resíduos de lâmpadas de LED	165
13.3. Caracterização de resíduos de lâmpadas LED	167
13.4. Recuperação de metais de resíduos de lâmpadas de LED	168
13.5. Conclusões	170
Referências	170
PARTE III - Estudos de caso	174
VERTAS	175
GM&Clog	178
INDÚSTRIA FOX	182
TRAMPPPO	186
NEXA	190
CIRCULAR BRAIN	193

PARTE I

APRESENTANDO OS CONCEITOS



INTRODUÇÃO

Os objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) estabelecidos pela ONU e resumidos em 17 metas globais, sintetizam a necessidade de se buscar soluções que possibilitem um desenvolvimento sadio, igualitário e sustentável para endereçarmos os principais desafios que as populações enfrentam. O momento da pandemia tornou mais evidente as desigualdades e trouxe urgência para a implementação de ações articuladas para a manutenção ou conquista de padrões satisfatórios de qualidade de vida.

Com a crise sanitária que a pandemia provocou, percebemos a importância da logística no fornecimento de produtos e serviços, e na antecipação de demandas sem as quais vidas sucumbiram. A mesma logística que não tem sido capaz de distribuir as toneladas de alimentos que já são produzidas mundialmente para alimentar uma parcela carente de habitantes de nosso planeta. Esta logística, ainda que quando realizada de forma reversa para recuperar produtos pós-consumo e resíduos, consome mais combustíveis não-renováveis e emite mais gases de efeito estufa do que a logística realizada sob a égide da economia linear. Como promover uma economia circular diante de tão diversos desafios?

Para além do anseio comum por um planeta saudável e sustentável, emerge a possibilidade de se recuperar valor a partir do reaproveitamento de produtos, componentes, materiais e energia. Uma equação um tanto complexa, mas que se torna cada dia mais necessária de modo a minimizar a exploração dos recursos naturais e mitigar os impactos ambientais. No Antropoceno, era marcada pelo impacto do homem na natureza, os resíduos resultantes do consumo de produtos e materiais tornam-se recursos antropogênicos que nos desafiam a explorá-los e recuperar algum valor.

Uma das alternativas para a recuperação de valor é o reuso dos produtos sob a forma de recursos secundários. São produtos pós-consumo como vestuário, embalagens e equipamentos eletroeletrônicos que ao atingirem o fim da vida perdem a utilidade para aquele que gera o resíduo, mas ganham potencial valor em uma gama de possibilidades. Os recursos antropogênicos, também compreendidos como recursos secundários ou ainda material residual são, respectivamente, a fonte de recursos e a fonte de energia do futuro, em uma economia circular composta por ciclos subsequentes ou complementares.

Ciclos eficientes e curtos que permitem o reuso com baixa demanda por armazenagem, processamento ou transporte. Nesse conjunto estão inseridas as soluções como reuso, recondicionamento, remanufatura, reparo e reprocessamento. Alternativas que estão sendo amplamente discutidas em todo o mundo como soluções não-destrutivas para economias de baixo carbono, gerando novos modelos de negócio, soluções de alto impacto e potencial inovador.

Os ciclos intermediários e longos que demandam energia e recursos para serem concluídos, mas que resultam na recuperação de materiais, substâncias, elementos e energia, também fazem parte dos princípios da economia circular e congregam soluções como a concentração (corte, trituração e moagem), recuperação (extração de materiais como técnicas clássicas e inovadoras da metalurgia ou tratamento de polímeros) e processamento (reciclagem mecânica, química ou energética).

Ao compreender que os recursos naturais são finitos e que os recursos antropogênicos são cada vez mais abundantes, ganha-se espaço para uma economia circular que, entre outras ferramentas, viabiliza a mineração urbana – com a recuperação de valor dos recursos secundários.

Estima-se um crescimento significativo de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) em todo o mundo. Antes mesmo da pandemia, o número de linhas de telefonia ativas no Brasil já

ultrapassava o número de habitantes do país. Com a necessidade de trabalho remoto imposta o consumo de equipamentos eletrônicos aumentou, os equipamentos obsoletos foram descontinuados ou descartados e um volume significativo de informação passou a transitar pela internet, exigindo infraestrutura mais robusta para suportar o volume e frequência de conexões com confiabilidade e exigindo intensidade energética para prover tais serviços. A manutenção, em algumas situações é descartada em razão do custo econômico e do tempo que demanda. Equipamentos de menor custo são rapidamente substituído por novos equipamentos e, desta forma, encurtando a vida útil dos produtos anteriores.

A equação parece relativamente simples e, ao mesmo tempo, assustadora. A demanda por conexão exige infraestrutura adequada. Esta, por sua vez, requer manutenção e, em dado momento, substituição de uma gama de equipamentos. Enquanto a manutenção requer a disponibilidade de peças, partes e componentes para reparo, a substituição, por sua vez, elimina produtos pós-consumo e o substitui por um novo equipamento. O novo equipamento que demandou recursos naturais explorados para a sua produção. O equipamento antigo, classificado como resíduo, segue para etapas de processamento que permitirão a recirculação com captura de valor em ciclos mais curtos ou mais abrangentes.

Nesse ponto emerge a questão se o Brasil possui infraestrutura para atender a demanda da gestão eficiente e circular dos REEE. Um tema sensível e que exige informação para que seja respondido a contento, e cujas respostas necessitam a convergência de diferentes áreas do saber, tais como logística, química, meio ambiente, biologia, engenharia de minas, engenharia de materiais, engenharia química, processos e tantas outras, fundamentais para o avanço da discussão e suporte às decisões.

Assim, a mineração urbana pode ser entendida como uma área de fronteira do conhecimento que demanda esforços coordenados e continuados para que modelos de negócio sustentáveis, técnicas compatíveis com as necessidades e regulamentações consistentes sejam desenvolvidos e aprimorados.

Neste livro, a temática da mineração urbana é abordada sob diferentes ângulos. Na primeira parte são apresentados os conceitos-base de economia circular, mineração urbana e a dicotomia entre a mineração tradicional e a mineração urbana. Evidencia-se a adaptação e aprimoramento das técnicas de extração de metais que são aplicadas na recuperação de insumos secundários. A mineração urbana herdou as ferramentas da mineração tradicional mas não possui ainda processamento de volumes tão expressivos; ainda assim, a eficiência do processo é superior em razão da concentração de materiais por tonelada de resíduo. Uma relação que tem motivado o interesse pela consolidação de parques ecoindustriais para a reciclagem de eletrônicos no país. Assim, na segunda parte do livro são discutidos os aspectos motivadores para a gestão dos REEE e o potencial de recuperação de valor a partir desse recurso secundário. Ao longo de sete capítulos são apresentados em detalhes o sistema de logística reversa, ferramentas informatizadas e de georreferenciamento, os indicadores aplicados e detalhamento da gestão de lâmpadas como exemplo de uma das cadeias produtivas, assim como pilhas e baterias, com sistema de logística reversa bem estruturado no país. Por fim, são apresentados estudos de caso brasileiros que já empreendem iniciativas sustentáveis na gestão de REEE.

Como pioneiro com a introdução do conceito da mineração urbana no Brasil, este livro se propõe a abrir as discussões e fundamentar o conceito da mineração urbana como proposta que está sendo debatida em diferentes países. A elaboração de normativas internacionais sobre o tema de gestão de recursos secundários e economia circular endossam a importância do tema. Seguramente este não será o único livro a apresentar a temática, mas como pioneiro na abordagem carrega uma importante dose de responsabilidade na transferência do conhecimento e na formação. Desta forma, o conteúdo se apresenta como subsídio ao pensamento crítico e, ao mesmo tempo, inspiração para novas abordagens.



CAPÍTULO 1

A MINERAÇÃO URBANA E A TRANSIÇÃO PARA UMA NOVA ECONOMIA

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ

Mestre e Doutora pela Engenharia de Produção

COPPE/UFRJ

Pesquisadora Titular no CETEM/MCTI

Luciana Contador

Bióloga pela UFRJ

Mestre em Ciências do Mar (USU)

Doutora em Ciências do Meio Ambiente

Universidade Paris VI

Pós doutoranda PPE COPPE-UFRJ

1. 1. Um recomeço para a economia global

No último trimestre do ano de 2019, teve origem, na cidade de Wuhan (China), a pandemia da Covid-19. O desconhecimento da origem, vias de contaminação, potencial de impacto e sequelas da contaminação pelo vírus SARS-COV-2 em humanos foram alguns dos fatores que possibilitaram a sua rápida propagação, em todo o mundo, ceifando mais de 2 milhões de vidas. Como resposta, foram estabelecidos gradualmente protocolos de segurança e restrições às atividades cotidianas. O funcionamento de escolas, comércio e transportes públicos foram descontinuados, as atividades na área de saúde foram priorizadas com procedimentos de linha de frente para conter o avanço da contaminação.

Em um primeiro momento, num cenário repleto de perguntas e poucas respostas consistentes, a recomendação global era para que as pessoas se mantivessem seguras em suas casas. Um ano depois, o isolamento permanece na maior parte dos países e a perspectiva de diferentes vacinas que começaram a ser aplicadas, no início do ano de 2021, permitiu a configuração de novas expectativas incluindo a retomada das atividades. No entanto muitas das mudanças já implementadas evidenciavam uma nova conformação social e econômica. As atividades passaram por uma rápida e desordenada transição baseada em interações exclusivamente remotas.

Basicamente, a situação de pandemia nos fez vivenciar a transição abrupta entre dois cenários.

- **Antes:** toda uma infraestrutura duplicada, para atender moradia e trabalho, vias de acesso congestionadas aumentando o tempo de deslocamento, excesso de veículos e indústrias contribuindo com o aumento das emissões atmosféricas e redução da qualidade do ar, rotas de deslocamento casa-trabalho-casa ou modais de transporte consumindo combustíveis fósseis e as interações interpessoais ocorriam presencialmente.
- **Depois:** alta ociosidade de toda uma infraestrutura disponível para espaços comerciais e de negócios, vias de acesso livres e frotas subutilizadas, alteração do tempo de deslocamento previsto para cargas, melhoria da qualidade do ar, as redes de conexão experimentaram rapidamente seus limites, a carga horária de trabalho passou a se confundir com momento livre e vice-versa, aumento do consumo energético, as relações profissionais e interpessoais migraram para o padrão remoto e o fortalecimento do e-commerce sob demanda.

Cenários significativamente distintos e com implicações significativas, no modo de consumo de produtos e serviços, relacionamento, infraestrutura e fortalecimento dos produtos, oferecidos na forma de serviços (do inglês, *Product as a Service* – PaaS) e do conceito de economia funcional.

De acordo com dados da Empresa Pública de Energia (EPE, 2020), houve redução significativa das emissões em todo o mundo. No Brasil, a redução foi de 19% no setor elétrico e 11% no setor de transportes, para a comparação entre o primeiro semestre de 2019 e o primeiro semestre de 2020. O mesmo estudo aponta que as classes comercial e industrial foram as mais impactadas, com redução de 9,6% e 5,6%, respectivamente. Enquanto a classe residencial apresentou aumento de 0,3% como reflexo positivo do confinamento.

Outro dado importante é a variação no padrão de consumo de equipamentos eletroeletrônicos. O consumo de equipamentos eletroeletrônicos foi impulsionado pela necessidade de se providenciar infraestrutura adequada para o estabelecimento de atividades remotas. De acordo com recente estatística, a respeito do consumo de equipamentos eletroeletrônicos, dados de 2019 revelam que o crescimento do consumo de equipamentos eletroeletrônicos na China atingiu a impressionante marca de US\$ 249.253,20 milhões, o que o qualifica como maior mercado produtor e exportador, seguido por Estados Unidos, Índia e Brasil (Tabela 1).

Tabela 1. Revenda de equipamentos eletroeletrônicos em 2019

País	Receita em milhões de dólares (2019)	Geração de resíduos eletroeletrônicos (2019) kt/ano
China	249.253,20	10.129
Estados Unidos	131.887,08	6.918
Índia	48.197,75	3.230
Brasil	48.014,92	2.143
Japão	43.392,88	2.569
Alemanha	31.915,17	1.607
Reino Unido	29.660,73	1.598
Rússia	27.416,45	1.631
França	26.613,71	1.362
México	26.099,93	1.220
Indonésia	20.302,32	1.618
Itália	19.666,84	1.063
Nigéria	16.428,94	461
Coréia do Sul	16.874,23	818
Canada	14.910,38	757
Espanha	12.495,96	888
Turquia	11.227,76	847
Austrália	10.762,31	554
Argentina	10.505,51	465
Arábia Saudita	9.369,87	595
Iran	9.492,13	790
Polônia	9.134,04	443
Filipinas	8.144,00	425
Nova Zelândia	7.035,62	96
Malásia	6.788,66	364

Fonte: Statista, 2021 e GEM, 2020.

O padrão de consumo de equipamentos eletroeletrônicos é um importante indicador para estudos que versam sobre a mineração urbana de produtos e materiais que derivam dessa cadeia produtiva. Os valores apresentados na Tabela 1 evidenciam a importância econômica do mercado de equipamentos eletroeletrônicos no mundo. Um seleto grupo composto prioritariamente por países desenvolvidos, mas que também conta com Índia, Brasil e Rússia, entre os dez maiores mercados globais, refletindo o impacto dos países emergentes nesse segmento em especial. A China representa o maior mercado mundial de equipamentos eletroeletrônicos, seguida pelos Estados Unidos. Esses dois países também

são os maiores geradores de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Dados do Global E-Waste Monitor (GEM, 2020), estima que em 2019, China e Estados Unidos geraram 10.129 e 6.918 quilotoneladas de resíduos eletroeletrônicos, respectivamente. Esses dois países juntos representam os maiores volumes da geração desses resíduos e das receitas com a comercialização dessa categoria de equipamentos, seguidos por Índia, Brasil e Japão. Desta forma, justifica-se o investimento dos produtores com a finalidade de custear os sistemas de coleta e processamento.

De acordo com Cossu e Williams (2015), o conceito de economia circular abrange as propostas de: minimização de resíduos, recuperação de recursos, reciclagem de materiais, mineração urbana e mineração de aterro. Na sequência apresentada, as propostas estariam consideradas, na escala de uma maior amplitude (economia circular), para menor amplitude (mineração de aterro). Assim, segundo esses autores, a mineração urbana considera a possibilidade de obtenção de insumos, a partir de fontes ou estoques secundários, entre os quais se considera, além do aterro, as construções, indústrias e produtos, por exemplo.

Enquanto a principal proposta da economia circular é dissociar o desenvolvimento econômico da necessidade de consumo de recursos finitos, a mineração urbana seria uma das ferramentas, para viabilizar a recuperação de matéria-prima secundária, a partir produtos e materiais pós-consumo. Muitos outros conceitos emergem, quando buscamos compreender a nova configuração, ao longo da cadeia de suprimentos (Figura 1).



Figura 1. Etapas de recirculação na cadeia de suprimentos

Apesar de se priorizar a etapa pós-venda e pós-consumo (a jusante ou *downstream*), a economia circular ainda tem impacto, nas etapas iniciais do ciclo produtivo (a montante ou *upstream*), nas quais a extração de matéria-prima, a partir de fontes finitas, resulta em impactos ainda mais significativos em razão da escala de processamento. Vide, a título de exemplo, a exploração de recursos minerais, como petróleo e minérios, que podem impactar grandes áreas para o beneficiamento de uma pequena proporção de produto. De outro modo, a exploração de recursos, a partir de fontes secundárias, permite redução do consumo energético, áreas impactadas e otimiza o processo de recuperação de materiais em razão da concentração no próprio produto final. Uma questão que será explorada, no Capítulo 9, a partir da gestão de materiais críticos.

Lepawsky (2020) reforça que, em 2021, o mundo atingirá em breve a geração de 52 milhões de quilotoneladas de resíduos eletroeletrônicos, mas reforça o impacto a montante da cadeia produtiva e, para tanto, apresenta valores relativos à manufatura de equipamentos eletroeletrônicos no bloco econômico NAFTA. Ainda assim, o autor evidencia que empresas de eletrônicos, instaladas na América

do Norte, ainda recebem peças, partes e componentes produzidos em diferentes países, aumentando a complexidade do rastreamento dos impactos ao longo da cadeia produtiva. Desta forma, considerar os custos ambientais, antes mesmo da comercialização de um equipamento eletroeletrônico, é um importante aspecto a ser considerado na gestão de cadeias produtivas focadas em modelos de negócios baseados no conceito da economia circular.

As diferentes possibilidades que compõem o processo de circularidade requerem integração e, para tanto, a necessidade de conhecimento da atuação dos agentes a montante e a jusante de cada estágio. Verifica-se que, na busca pela quantificação dos insumos e produtos, que surgem nas diferentes etapas, há a possibilidade de recontagem nas entradas e saídas dos sistemas – talvez esse seja um dos principais desafios a serem considerados em estudos futuros.

1.2. Pós-pandemia e oportunidades de circularidade

A gestão de resíduos eletroeletrônicos tem motivado pesquisas e atraído empreendedores em todo o mundo, com o propósito de auferir lucros a partir da recuperação e comercialização de materiais nobres, por meio de processos caracterizados como *upcycling*. Este último conceito tem como premissa a valorização de resíduos, produtos e materiais pós-consumo por meio, por exemplo, da logística reversa, recuperação e beneficiamento de produtos e materiais. Resultando, ao final do processo, em produto com valor superior ao insumo que o originou. No entanto há ainda outras duas possibilidades. A primeira é o cenário de *downcycling*, no qual há desvalorização do produto final que, por motivos técnicos ou de mercado, passa a ter menor valor após o processamento; e a segunda caracteriza-se por processos que demandam descontaminação e, por isso, há incidência de custos para o seu processamento, como é o caso de monitores CRT que deixaram de ser fabricados próximo ao ano de 2006 em todo o mundo, peças e partes de equipamentos eletrodomésticos que apresentam material contaminante e lâmpadas que possuem mercúrio em sua composição, por exemplo.

Para além da discussão dos potenciais riscos inerentes ao processamento de determinadas categorias de resíduos, há a premência de se compreender os fluxos possíveis para a gestão eficiente dos resíduos. Desta forma, conceitos importantes têm sido construídos e se consolidado de formas diferenciadas, conforme as soluções que se apresentam, como é o caso das propostas alinhadas ao conceito da economia circular e da mineração urbana.

Alguns países desenvolvidos se destacaram na gestão de resíduos eletroeletrônicos por direcionar recursos para o estabelecimento de parques especializados em processamento, investindo em maquinário capaz de recuperar matéria-prima secundária sem a necessidade de desmontagem dos equipamentos. Ou ainda soluções capazes de mitigar o impacto de substâncias perigosas a partir, por exemplo, de técnicas de segregação automáticas. Por outro lado, países em desenvolvimento contaram com a valiosa mão de obra dos catadores, que atuavam na coleta e pré-processamento de uma ampla diversidade de equipamentos, peças, partes e componentes, desconhecendo os riscos e impactos do manuseio e sem estarem amparados por políticas de saúde e segurança específicas para o segmento. A mineração urbana, portanto pode alcançar uma infraestrutura cara e complexa ou simplesmente ser viabilizada a partir de mecanismos mais simples com processamento manual. A definição do grau de risco embutido nas etapas de processamento de resíduos eletroeletrônicos ainda não está completamente evidenciada em razão da diversidade e complexidade de produtos e substâncias que os representam e dos diferentes níveis de atuação.

Se, por um lado, uma relação desigual se estabeleceu mundialmente para a recuperação de recursos, por outro, foram usufruídos benefícios econômicos. Assim, mesmo os países emergentes, apesar dos diversos riscos inerentes às práticas implementadas, conseguem atingir níveis significativos de

eficiência com base na especialização do trabalho manual que, em parte, superam os processos automatizados. Nesse quesito, os altos níveis de processamento manual de resíduos eletroeletrônicos, na Austrália (Dias et al., 2018), evidenciam a importância da eficiência na obtenção de peças, partes e componentes com significativo grau de segregação. A implementação de técnicas e equipamentos de segurança ocupacional, a desmontagem manual pode garantir uma relação ganha-ganha nas etapas iniciais da logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos, tema abordado no Capítulo 7.

A seguir, são apresentados aspectos do processamento de resíduos eletroeletrônicos, no Japão, considerado um case de sucesso no segmento.

Boas práticas da gestão de resíduos eletroeletrônicos no Japão

O processamento de resíduos eletroeletrônicos, em plantas de reciclagem no Japão, possui basicamente cinco etapas: armazenagem (externa e interna), desmontagem manual, moagem, separação (automatizada) e reciclagem. Os processos passam por etapa de amostragem e avaliação

A principal regulamentação da gestão de resíduos eletroeletrônicos, no Japão, foi implementada, a partir de 2001, segundo o conceito de ciclagem de materiais, quando teve início a implementação para equipamentos domésticos e atribuição de responsabilidades da seguinte forma:

- Consumidores finais: pagamento da taxa de reciclagem;
- Comerciantes: coleta de equipamentos de uso doméstico;
- Fabricantes: coleta e reciclagem de equipamentos.

A partir desse período, o alvo foram quatro categorias: (i) ar-condicionado, (ii) televisores, (iii) refrigeradores, freezers e (iv) máquinas de lavar e secar roupas.

Em 2013, foi regulamentado e implantado o sistema específico, para equipamentos de pequeno porte, (exceto as categorias anteriores), bem como estabelecidas as responsabilidades especificadas, conforme a seguir:

- Consumidores finais: entrega dos equipamentos pós-consumo ao comerciante ou outro coletor;
- Comerciantes: auxiliam na garantia do processamento adequado dos equipamentos por parte dos consumidores;
- Fabricantes: reduzir o custo da reciclagem utilizando materiais recicláveis.

As metas de reciclagem por categorias foram definidas entre 50 e 70% do total colocado no mercado a partir do ano de 2008. Em 2016, o Japão contava com 47 plantas de reciclagem divididas em três grupos de empresas produtoras, exemplificados da seguinte forma:

Grupo A: Panasonic, Toshiba, Corona, JVC, Daikin.

Grupo B: Hitachi, Mitsubishi, Sony, Sharp, Funai, Chofu, Fujitsu General, Mitsubishi Heavy Industries.

Outros: demais marcas.

Entre os produtos recuperados, por meio da mineração urbana, estão: cobre, clorofluorcarbono, HDPE, LDPE, ferro e alumínio.

As Olimpíadas 2020 contam com medalhas que foram confeccionadas a partir da recuperação de metais de resíduos eletroeletrônicos, com a recuperação de ouro (30,3 kg), prata (4.100 kg) e bronze (2.700 kg), com cada medalha com um peso médio de 556 gramas. Foram recebidas doações de celulares usados a partir de pontos de coleta disponibilizados em serviços postais, nas esquinas, em instituições educacionais e lojas de equipamentos eletrônicos no Japão. Foram coletados ao todo

quase 79 mil toneladas de celulares usados, equivalentes a cerca de 6,2 milhões de aparelhos pós-consumo. Tal iniciativa reflete o alto grau de organização e comprometimento do Japão na gestão dos resíduos eletroeletrônicos.

A inspiração, segundo os organizadores, veio dos jogos realizados nas Olimpíadas de 2016, realizada no Rio de Janeiro, onde cerca de 30% das medalhas de prata e bronze foram confeccionadas a partir de matéria-prima reciclada.

Fonte: Ternald, 2019 e Tokyo, 2020.

Algumas cidades japonesas já possuem sistemas de redução de carbono, consumo energético eficiente e geração zero de resíduos a partir de programas implementados há décadas. Um dos modelos mais bem-sucedidos é o da cidade de Kamikatsu em que os moradores são responsáveis por fazer a separação de 34 categorias de resíduos e reciclam 80% dos resíduos gerados, refletindo o grau de engajamento da população local. Assim, além de um conjunto de regulamentações estruturado em consistente, o Japão ainda conta com uma infraestrutura bem-estabelecida e a participação da sociedade que internalizou e adotou os conceitos-chave da economia circular e da prática da mineração urbana.

1.3. Aspectos geográficos e econômicos

Para além de definir os limites para a gestão de resíduos em termos geográficos, a Convenção da Basileia traduziu a discrepância da gestão de resíduos entre os países desenvolvidos e os países em desenvolvimento. O documento estabelece diretrizes para os movimentos de resíduos, em especial, os perigosos, entre os países, com vista a coibir a exportação de resíduos rumo aos países em desenvolvimento. Esse direcionamento evidencia o impacto das motivações econômicas quanto à importância do desempenho ambiental. Muitos países europeus alcançaram índices satisfatórios à gestão de resíduos, a partir da exportação de resíduos perigosos, uma prática invisível nos mecanismos de mensuração do desempenho ambiental, mas que passou a ganhar destaque com propostas como a Convenção da Basileia.

Em 2012, o autor Wang (2012) introduziu a filosofia do “Melhor de Dois Mundos” (do inglês Best of Two Worlds, ou Bo2W), a partir da qual países emergentes poderiam se beneficiar de soluções para a gestão de resíduos eletroeletrônicos, com base na consolidação de uma rede que se inicia com a desmontagem manual e implementação de técnicas seguras à recuperação de materiais nos países em desenvolvimento. Na sequência, o REEE é comercializado e encaminhado a unidades especializadas e automatizadas de processamento em países desenvolvidos.

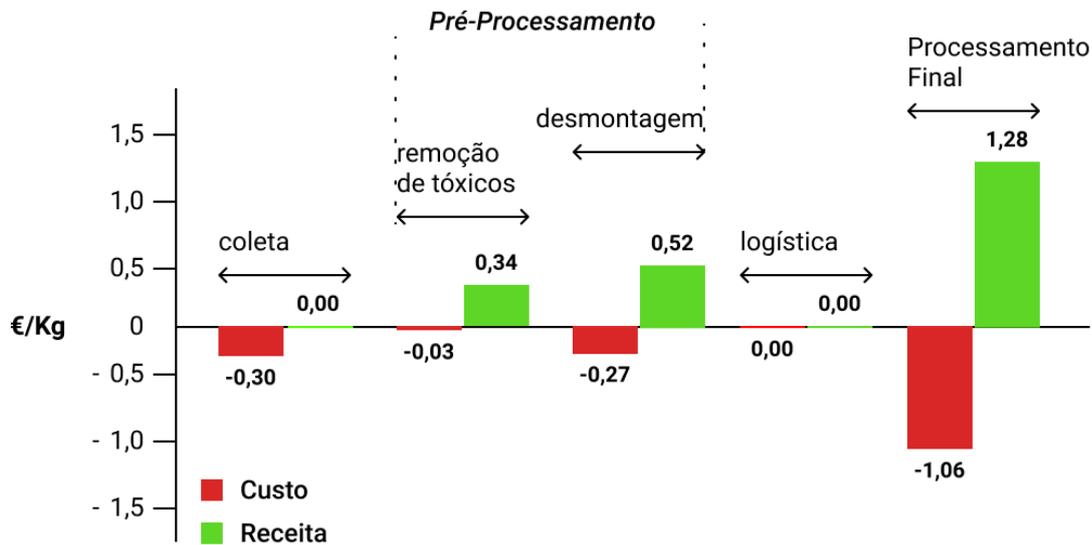


Figura 2. Valores de revenda e custo de processamento para desktops em diferentes estágios segundo a filosofia do Bo2W (Wang, 2012)

A filosofia Bo2W, considerada como a melhor solução para países em desenvolvimento, prevê o pré-processamento local com desmontagem manual dos equipamentos eletroeletrônicos e a comercialização das denominadas ‘frações críticas’, ou seja, aquelas com maior valor e processamento vias rotas tecnológicas de alto impacto. A Figura 2 evidencia os ganhos, ao longo das etapas, que antecedem o processamento final para fins de destinação de desktops. Cabe ressaltar que, diferentemente dos fluxos logísticos tradicionais, na cadeia reversa, a etapa de processamento ocorre no final e a coleta equivale à obtenção de matéria-prima secundária. Esse esquema reflete o discurso de muitos recicladores de resíduos eletroeletrônicos cujos custos logísticos e de gestão acabam comprometendo os ganhos efetivos com o gerenciamento dessa categoria de resíduos. Essa premissa pode se confirmar em algumas categorias que demandam algum grau de descontaminação, mas, de fato, pode ser diferenciada para outras categorias, como as placas de circuito impresso e processadores de computador que possuem um valor considerável de mercado.

Uma década após a introdução desse conceito, podemos perceber que a proposta do Bo2W se configura como um conjunto de soluções sustentáveis e inteligentes que favorecem um ciclo virtuoso, mas fortemente dependente do mercado internacional e de fluxos logísticos eficientes, bem como regulamentações e relações comerciais harmônicas entre as nações. Quesitos que ainda não são a realidade global, em especial, na atual pandemia que enfrentamos.

Maior parte dos recursos naturais do mundo encontram-se disponibilizados, em reservas localizadas, em países em desenvolvimento e, em especial, naqueles que representam o bloco econômico BRICS. A título de exemplo, a exploração de recursos minerais, em países como Congo (cobalto), Chile (cobre), Rússia (níquel e platina) e Brasil (minério de ferro e nióbio), mostram-se estratégicos em razão dos volumes disponíveis e do valor de mercado. A China, se destaca nesse cenário por concentrar volume e diversidade de recursos. Enquanto commodities, esses recursos são explorados, beneficiados e, em maior parte, exportados. Ao que parece, esses países não avançam seu parque fabril com vistas a atender sequer as demandas internas por produtos acabados e, por isso, mantêm-se na condição de exportadores de commodities e importadores de produtos acabados.

Em um cenário ainda mais alarmante, há situações, nas quais os minerais explorados são classificados como minerais de conflito (do inglês, *conflict minerals*¹), que subsidiam atividades ilícitas e até mesmo conflitos armados. Cenários que perpassam as fronteiras geográficas e impactam para além das questões ambientais.

A proposta de modelos de negócio circulares, por sua vez, surge como uma possibilidade mais adequada, no que diz respeito à autonomia dos países em implementar soluções adequadas às suas especificidades. À medida em que a economia circular, em contraponto com o modelo da economia linear (extrair, produzir, consumir e descartar), preconiza o estabelecimento de economias restaurativas e regenerativas. Percebe-se a necessidade de integração simbiótica entre os elos da cadeia produtiva, não sendo mais suportadas relações desarmônicas, permitindo-se avançar tomando emprestados alguns conceitos da Ecologia. Na economia circular, as interações entre indústrias de um mesmo segmento (intraespecíficas) ou segmentos distintos (interespecíficas) não seguem mais a competitividade predatória ou parasitária, mas, sim, buscam integração por mecanismos simbióticos, de mutualismo e cooperação. Ou seja, relações baseadas no ganho mútuo e, tendo como meta, o estabelecimento de padrões de sustentabilidade para o bem comum. Um conceito relativamente simples, mas difícil de ser mensurado e que requer mudanças estratégicas.

Por isso, percebe-se que o momento de crise econômica pós-pandemia é propício a mudanças, como a guinada rumo à economia circular (Strand & Toman, 2010; Ellen MacArthur Foundation, 2020; Material Economics, 2020). A economia circular (EC) pode ajudar na recuperação econômica no momento pós-pandemia, aumentando a oferta de empregos (Bowen & Kuralbayeva, 2015; Circular Economy Policy Research Center, 2018) e oportunidades de negócios; reduzindo a dependência da importação de matéria-prima. Considerando-se as restrições impostas pela condição de pandemia, a redução da dependência de relações comerciais intercontinentais ou até mesmo entre países contíguos, configura-se como uma importante vantagem competitiva. Não que a autossuficiência seja uma premissa para a EC, mas o momento de crise na saúde e econômica tende a exigir soluções com menor deslocamento geográfico e possibilidade de geração local de emprego e renda, uma equação complexa, mas necessária.

Os indicadores globais retratam a modificação tanto no padrão de consumo quanto na oferta de produtos e preços praticados. Em poucas palavras, o conceito de crescimento e desenvolvimento pode estar ganhando novos contornos a partir da mudança de valores. De modo diferente de outras pandemias, como a Peste Negra e a Gripe Espanhola, a Covid-19 possui elementos significativamente diferentes, em relação aos momentos anteriores como, por exemplo, as economias emergentes que estabeleceram espaço de competição com grandes economias mundiais, o crescimento da população global atingiu altos níveis e, especialmente, a internet. Esse último aspecto permitiu a manutenção e o aumento dos padrões econômicos a partir das atividades realizadas de modo remoto.

De acordo com dados da Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE), a comparação dos índices entre dezembro de 2019 e dezembro de 2020 revelam que a produção física da indústria eletroeletrônica cresceu 23,2%, enquanto a indústria, em geral, cresceu 8,3% e a indústria de transformação teve um crescimento de 10,2%. (Figura 3). Tal crescimento da indústria eletroeletrônica revela uma possível adequação da sociedade à necessidade do estabelecimento de infraestrutura para trabalho e lazer de forma remota.

¹ Minerais de conflito também são conhecidos como 3TG, representando estanho, tungstênio, tântalo e ouro (do inglês *tin, tungsten, tantalum e gold*) e estão geralmente relacionados com o subsídio a conflitos armados relacionados a atividades ilegais e/ou sérios abusos dos direitos humanos.

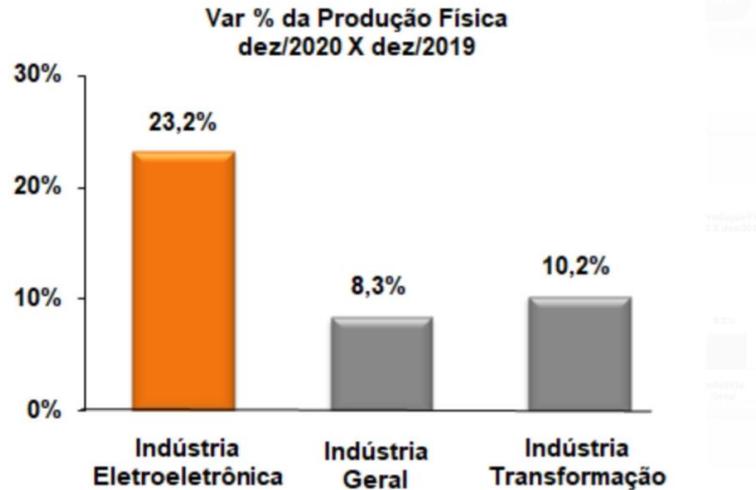


Figura 3. Comparativo da variação do percentual da produção física entre dezembro/2019 e dezembro/2020

Fonte: ABINEE, 2021.

Em uma rápida avaliação do cenário que se consolida, pode-se perceber que o momento é ainda mais favorável à circularidade na gestão de eletroeletrônicos e seus resíduos, em razão do aumento dos volumes pós-consumo, que tendem a se originar de consumidores que adquirem novos equipamentos e descartam os mais antigos. A vida útil dos equipamentos em uso pode vir a ser encurtada em razão da demanda por novas tecnologias, sendo aspectos motivadores, para a demanda por novos equipamentos, por exemplo, a capacidade de processamento, a resolução ou ainda a adequação ao espaço físico. Desta forma, o descarte dos equipamentos tende a aumentar, para fins de reúso, recondicionamento, reparo, remanufatura ou reciclagem – algumas das possibilidades englobadas no conceito de economia circular.

Da mesma forma, a iminente revolução 5G tornará obsoletos, em um curto espaço de tempo, os equipamentos eletroeletrônicos atualmente em uso, incompatíveis com redes anteriores. Podemos prever um aumento no volume de equipamentos descartados por usuários ávidos por aparelhos da nova tecnologia. A cadeia pós-uso desses equipamentos e de REEE precisa estar preparada para aproveitar a maior quantidade de material e gerar a menor quantidade de rejeitos. Ao mesmo tempo, muitos produtos estarão em processo de design, que deverá considerar, além da tecnologia 5G, a eliminação de substâncias perigosas, a inserção de insumos reciclados no equipamento, bem como a viabilidade de reparo, upgrade e facilidade na desmontagem e reciclagem.

1.4. Conclusões

Este capítulo inicial teve como objetivo apresentar de modo preliminar os elementos que compõem a economia circular e aprofundar a temática da mineração urbana de forma crítica e analítica.

Os riscos inerentes ao manuseio do processamento dos resíduos eletroeletrônicos não precisam ser considerados como limitantes, mas podem impulsionar o desenvolvimento de alternativas seguras e sustentáveis, para a recuperação de matéria-prima secundária, a partir da mineração urbana. Extrair valor de produtos e materiais, ao atingirem o final de sua vida útil, é um desafio que exige a integração

de diferentes áreas do conhecimento, bem como o estabelecimento de políticas públicas e canais bem estruturados de cadeias de suprimentos reversa.

A mineração urbana é um conceito ainda em construção e que pode ter diferentes abordagens, em sua maior parte tecnológicas, para a consolidação de mecanismos que possibilitem a recuperação de matéria-prima secundária, por meio da valorização de produtos e materiais pós-consumo. Para tanto, os conceitos de padrão de consumo e final de vida precisam ser definidos, a fim de que sejam possíveis projeções a respeito do potencial de recuperação de valor em médio e longo prazo. Da mesma forma, as ferramentas, para a economia circular, devem ser bem compreendidas e as cadeias de suprimento geridas de modo a compactuar com as metas de sustentabilidade estabelecidas.

As especificidades dos países, no que tange aos mecanismos regulatórios, nível de desenvolvimento econômico, configuração de mercado e aspectos geográficos relativos ao consumo e destinação de resíduos eletroeletrônicos, serão discutidos nos próximos capítulos.

Referências

ABINEE, 2021. Panorama Econômico. Desempenho setorial. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/programas/50anos/public/panorama/2020/> Acesso em março de 2021.

COSSU, R., WILLIAMS, I.D., 2015. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. Waste Management. Vol. 45, Pp 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>.

DIAS, P., BERNARDES, A.M., HUDA, N., 2018. Waste electrical and electronic equipment (WEEE) management: An analysis on the Australian e-waste recycling scheme. Journal of Cleaner Production. Vol, 197. Pp. 750-764. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.161>.

EPE, 2020. BALANÇO COVID-19 Impactos nos mercados de energia no Brasil 1º semestre de 2020. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-500/Balanco_Covid-19%20rev.pdf . Acesso em março de 2021.

LEPAWSKY, J., 2020. Sources and Streams of Electronic Waste, One Earth, Vol. 3, Issue 1. Pp. 13-16, <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.001>

STATISTA, 2021. Revenue of the consumer electronics market worldwide by country in 2019. Disponível em: <https://www.statista.com/forecasts/758660/revenue-of-the-consumer-electronics-market-worldwide-by-country>. Acesso em fevereiro de 2021.

TERNALD, D., 2019. E-waste management in Japan Best Practices. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/Policy-awareness-workshop-on-E-waste/E-waste%20management%20in%20Japan.pdf>. Acesso em março de 2021.

TOKYO, 2020. The metals. <https://olympics.com/en/olympic-games/tokyo-2020/medal-design>. Acesso em novembro de 2021.

WANG, F., HUISMAN, J., MESKERS, C.E.M., SCHLUEP, M., STEVELS, A., HAGELÜKEN, C. The Best-of-2-Worlds philosophy: Developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies. Waste Management, Vol. 32 (11), 2012. Pp 2134-2146. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.029>



CAPÍTULO 2

MINERAÇÃO PRIMÁRIA E MINERAÇÃO SECUNDÁRIA: Uma breve análise comparativa na cadeia reversa dos eletroeletrônicos

Giovanna Novello Petrunaro

Graduanda em Geologia pela UFRJ
Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Ricardo Sierpe Vidal Silva

Geógrafo pela UFRJ
Mestre e Doutor em Geociências PPGEOQ/UFF
Bolsista PCI-DA CETEM/MCTI

Marianna Ottoni

Engenheira Ambiental pela UFRJ
Mestre pelo Programa de Planejamento Energético -
COPPE/UFRJ

2.1. Introdução

A extração mineral é uma atividade milenar. Desde o início da história humana, o desenvolvimento e crescimento socioeconômico têm sido acompanhados por maior consumo de bens minerais. Atualmente, os minerais metálicos representam um quinto do consumo mundial, em matéria-prima e são, majoritariamente ofertados pela mineração tradicional ou primária, que realiza a extração a partir de reservas naturais (MCCARTHY & BÖRKEY, 2018).

Ao longo do tempo, a extração de minério, o uso de metais na manufatura dos mais diversos produtos e infraestrutura urbana, além do seu descarte como “lixo”, resultaram no acúmulo de resíduos metálicos *above ground* (sobre a superfície), ou mesmo os chamados “estoques de material hibernando” (*hibernating material stocks*, do inglês) (WALLSTEN *et al.*, 2013). Os resíduos metálicos, presentes nessa reserva antropogênica, seja em aterros, nos resíduos recuperados, por meio dos sistemas de logística reversa (SLR) ou mesmo estocados nos materiais urbanos, passam a serem vistos como fonte para a recuperação/extração de matéria-prima secundária pela denominada mineração urbana (*urban mining*) ou secundária.

Este capítulo visa, portanto abordar a comparação entre alguns aspectos da mineração primária e da mineração secundária a partir dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE).

Enquanto a mineração primária consiste na extração de recursos naturais, por meio da lavra de uma jazida mineral e o processamento dos minérios (XAVIER & LINS, 2018), a mineração urbana possibilita a recuperação de energia e matéria-prima secundária, a partir dos materiais presentes em produtos descartados, ao final de sua vida útil, geralmente concentrados nas cidades e em aterros (SERRANTI *et al.*, 2012). A mineração de aterro recupera a matéria-prima a partir de resíduos descartados em aterros. A mineração urbana amplia esse estoque antropogênico, incluindo edificações, estruturas, indústrias e produtos diversos (em uso e após vida útil) (LEDERER *et al.*, 2014; COSSU & WILLIAMS, 2015).

O termo “mineração urbana” ainda é relativamente recente, uma vez que a preocupação com a destinação final de resíduos eletroeletrônicos se tornou maior, na última década, a partir da Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei N°12.305/2010 e Decreto 7.404/10, que estabelecerá a responsabilidade compartilhada por cada etapa do ciclo de vida dos produtos, desde a produção até o descarte e a destinação ambientalmente adequada dos materiais na sua fase pós-consumo.

Os benefícios econômicos da mineração urbana ainda não foram explorados em sua totalidade (ZENG *et al.*, 2018). A exemplo da China, que se tornou o maior gerador de resíduo eletroeletrônico (REEE) do mundo, mas, ao mesmo tempo, passou a ser uma figura de liderança na mineração urbana a partir de REEE. Por outro lado, os meios, para se atingir a recuperação de materiais e buscar ganhos econômicos, nem sempre seguem padrões de segurança e sustentabilidade. A região de Guyiu na China, por exemplo, é conhecida pelo significativo impacto social e ambiental que deriva da recuperação de minerais preciosos (LI *et al.*, 2011; KIM *et al.* 2020).

No caso dos REEEs, estudos como o de Zeng *et al.* (2018) apontam para o fato de que os custos da mineração primária são baseados nos custos dos metais, o que faz com que seja mais onerosa financeiramente, enquanto os custos da mineração urbana dependem da dificuldade de reciclagem de

cada material que compõe o REEE. Esse mesmo estudo destaca que já existem comprovações do grande potencial, na reciclagem de metais presentes nos REEEs, por meio dos processos da mineração urbana, sendo a solução mais sustentável para esses tipos de resíduos.

A discussão desses tópicos é ainda mais ampla e complexa e exige maior aprofundamento das definições e análise de especificidades de regiões, regulamentações e características dos materiais passíveis de mineração. Desta forma, os tópicos seguintes permitem melhor entendimento dessas especificidades.

2.2. Mineração no Brasil

O Brasil é um país rico em reservas minerais. As principais províncias e distritos mineiros do país demonstram o grande potencial do território brasileiro para ferrosos (Fe, Mn), não ferrosos (Al, Cr, grafita, talco, Sn, W), metais preciosos (Au), metais-base (Pb, Cu, Zn), especiais (Co, Li, Ta, ETR, Pt, Pl, Ti, Nb, Ni, V) e agregados para a construção civil (IBRAM, 2020). Segundo o estudo de Nicolai (2016), o setor de mineração sempre teve um papel importante, na história do Brasil, um exemplo disso é a extração de ouro (Au), no estado de Minas Gerais, o qual se tornou o centro econômico da colônia na primeira metade do século XVIII. Ainda, segundo esse último autor, atualmente a mineração ainda é uma das atividades econômicas mais importantes de Minas Gerais, onde há mais de 300 minas em operação, incluindo 57 das 200 maiores do país.

Nicolai (2016) afirma que uma série de fatores impacta os custos e as cotações do Au, a saber: a) reposição de reservas geológicas; b) escassez de projetos; c) restrições de infraestrutura e energia; d) pressões de custo de produção; e) aumento dos riscos associados ao setor mineral; f) custos ambientais e de relação com as comunidades; g) pressão de compra de Au pelos bancos centrais; h) qualidade das reservas e sua respectiva complexidade; i) aumento dos custos de beneficiamento; j) diversificação dos ativos financeiros nos países emergentes; k) políticas monetárias; l) situações de crise mundial e local; m) inflação local e mundial; n) contratos futuros de compra/venda do Au; o) consumo industrial de joias e da indústria eletrônica; p) vendas do Fundo Monetário Internacional (FMI). O aumento mundial da população, a recomposição de reservas pelos bancos centrais e o consumo de Au dos países emergentes também são outros fatores citados pelo autor, que devem ser levados em consideração para o aumento do consumo desse metal.

O Brasil é dos maiores exportadores (*global/player*) de minérios, como nióbio, ferro e bauxita. Autossuficiente em calcário, diamante industrial, tungstênio e talco, o país é dependente da importação de carvão metalúrgico, potássio e terras raras, conforme ilustrado no Quadro 1.

Quadro 1. Produção e dependência mineral do Brasil.

Exportador Global/Player	Exportador	Autossuficiente em	Importador	Dependência externa de
Nióbio (1º)	Níquel	Calcário	Cobre	Carvão metalúrgico

Tantalita (2º)	Magnésio	Diamante	Enxofre	Potássio
Ferro (2º)	Caulim	Titânio	Fosfato	Terras raras
Grafite (3º)	Estanho	Tungstênio	Diatomito	
Bauxita (3º)	Vermiculita	Talco	Zinco	
Rochas ornamentais (4º)	Cromo			
	Ouro			
Minerais estratégicos				Minerais estratégicos

Fonte: Adaptado de IBRAM (2013).

No ano de 2021 foram estabelecidos dois importantes marcos sobre a gestão de minerais estratégicos no país. O Decreto Federal nº 10.657/2021 estabelece a política de apoio ao licenciamento ambiental de projetos de investimentos para a produção de minerais estratégicos, enquanto a Resolução nº 2 estabelece os minerais estratégicos que serão objeto da referida política. Ambos os instrumentos fortalecem a estruturação de uma rede para a exploração dos recursos naturais, mas também reforça as possibilidades para a recuperação de valor a partir da exploração de materiais secundários.

Apesar de ser dependente da importação de alguns minerais, a riqueza, em reservas naturais de minério, pode ser um desestímulo à recuperação de matéria-prima secundária no Brasil, sobretudo, porque, atualmente, o país segue exportando *commodities* e importando os produtos industrializados.

Além disso, por sua grande extensão territorial, o uso do solo, para aterros sanitários e barragens de rejeitos da mineração, não é uma questão tão prioritária para o Brasil, quanto para países de menores dimensões territoriais, como muitos dos países europeus.

E, ainda, o descarte de REEE é difuso, ocorrendo por toda a extensão do território, enquanto as empresas recicladoras encontram-se concentradas na região Sudeste, sobretudo, em São Paulo. O transporte de REEE de todo o país para uma só região pode inviabilizar a mineração urbana de grande parte dos resíduos gerados no Brasil. Nesse sentido, considerando os desafios logísticos, em nível nacional, o Projeto DATARE do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) tem por objetivo rastrear toda a cadeia de REEE, conhecendo os fluxos e localizando os *hotspots* para contribuir com o desenvolvimento do setor de reciclagem e mineração urbana de REEE no Brasil, sendo um exemplo de iniciativa para melhorias na logística reversa desses materiais e consequente implementação da mineração secundária.

2.3. Mineração primária e seus impactos

A mineração engloba atividades de extração e fornecimento de matéria-prima, para a indústria de transformação à produção de bens essenciais, evoluindo, ao longo dos séculos, para negócios que hoje buscam se adequar às diretrizes internacionais de sustentabilidade (XAVIER *et al.*, 2019). Segundo

Hartman & Mutmansky (2002), a mineração primária pode ser caracterizada pelas seguintes etapas: (i) Pesquisa; (ii) Prospecção; e (iii) Lavra. Para Gomes *et al.* (2020), minérios são pesquisados e medidos, nas etapas de prospecção e exploração, assim como a exploração de um minério consiste na própria mineração, enquanto o beneficiamento do minério tem por objetivo regularizar o tamanho do minério extraído para um tamanho adequado, para as próximas etapas e, por fim, a recuperação do minério passa por processos metalúrgicos para obter o metal de interesse. Após o esgotamento do minério, a mina precisa passar pela etapa de descomissionamento (desativação e fechamento da mina), para garantir a segurança no local, mitigando e minimizando os impactos ambientais resultantes da fase de exploração.

Apesar do desenvolvimento econômico de regiões mineradoras, consequências dessa atividade são evidentes nas esferas social (deslocamento e bem-estar da população), ambiental (desmatamento, redução da biodiversidade, drenagem ácida de minas, acidentes ambientais) e econômica (despesas para a preparação do local de extração, entre outros) (SINGH & SINGH, 2016). De acordo com Nicolai (2016), o diretor de Segurança e Desenvolvimento Sustentável da Unidade Níquel da *Anglo-American* abordou o conceito "Zero Lesão" (do inglês "*zero harm*"), referente ao processo de mineração do ouro, como uma atividade de alto grau de risco, não atingindo nunca um patamar confortável e, portanto destacou a prevenção como a forma mais efetiva para o sucesso. A exemplo disso, foram traçados vários estudos com a Universidade Federal de Goiás (UFG) e com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), principalmente em relação à revegetação, com o intuito de minimizar o impacto de áreas mineradas.

Os impactos ambientais, derivados da atividade mineral, são significativos, uma vez que diversos produtos, como os eletroeletrônicos, são feitos à base de recursos minerais (NICOLAI, 2016), o que implica um ritmo acelerado de extração mineral e conseqüente risco de esgotamento de reservas e aumento de impactos ambientais, nas últimas décadas. Em decorrência de tais ameaças, há uma crescente tendência internacional de uma economia industrial cada vez mais baseada nos produtos fabricados, a partir de fluxos de recursos menos dependentes da mineração tradicional (que não é capaz de se manter sustentável em longo prazo) e mais pautada na circulação dos materiais extraídos de produtos reciclados (Zeng *et al.*, 2018).

2.4. Mineração secundária de REEE e seus impactos

A economia circular pode ser uma alternativa atual para minimizar os impactos que o ser humano produz no meio ambiente, por se tratar de um modelo sustentável unido ao ritmo tecnológico e comercial do mundo. Segundo Gomes *et al.* (2020), por englobar a recuperação de matérias-primas, a partir de resíduos (matéria-prima secundária), a mineração urbana (ou secundária) tem crescido substancialmente, sendo considerada como um instrumento da economia circular (OTTONI *et al.*, 2020). Os processos envolvidos nessa abordagem têm claras vantagens socioeconômicas, principalmente por contribuir para o desenvolvimento do mercado da reciclagem, o que se configura como um grande benefício às economias emergentes (Gomes *et al.*, 2020).

A mineração secundária cobre um conjunto de operações, desde a coleta até o processamento para a recuperação de materiais e elementos de interesse, como descrito no Quadro 2.

Quadro 2. Etapas simplificadas da mineração secundária de REEE

Estágio	Descrição
Coleta	O produto é retirado do local de descarte e segue para etapas de separação ou triagem a partir de uma logística primária de coleta, acondicionamento e transporte. Pode ocorrer por meio do recebimento em pontos de entrega voluntária (PEVs), por meio de campanhas ou coleta em domicílio.
Triagem	Separação e classificação por tipo de resíduo, possibilitando etapas não destrutivas (reparo, recondicionamento, remanufatura) ou destrutivas (moagem, trituração, quebra, etc), em função da destinação pretendida.
Descaracterização	Retirada de marcas ou dados com a finalidade de não possibilitar a identificação ou recuperação de informações.
Pré-processamento	Identificação do valor agregado com recuperação de peças, partes, componentes ou ainda materiais a partir de etapas de segregação, limpeza ou concentração.
Recuperação	Recuperação de valor a partir de técnicas de Waste to Resources (WtR) ou Waste to Energy (WtE). Inclui reciclagem química, mecânica ou energética, visando ampliar a circularidade.

A instituição que congrega os Laboratórios para Ciência de Materiais e Tecnologia (EMPA), em 2011, apontou que a mineração urbana, por meio da simples reciclagem do resíduo eletroeletrônico, pode recuperar milhões em dinheiro e, portanto quanto maior for a quantidade de REEE, mais barata fica a sua reciclagem. É por meio desses lucros que Nicolai (2016) afirma que a mineração urbana se trata de um novo conceito de obtenção de minerais preciosos, a partir da reciclagem de REEE, por meio de um tratamento adequado e economicamente viável.

Apesar dos pontos positivos, em termos ambientais e socioeconômicos, para que a mineração urbana seja viável, destaca-se a necessidade de garantia de volumes mínimos de resíduos descartados, maior gargalo da mineração urbana, para abastecerem os fluxos reversos, o que se dá a partir de um sistema de logística reversa (coleta, transporte, armazenamento, destinação) eficiente (KHALIQ *et al.*, 2014; CUGULA *et al.*, 2020; GOMES *et al.*, 2020). Isso pode ser considerado um desafio a muitos países emergentes, onde ainda não existem programas de coleta seletiva.

Os REEE são resíduos advindos de equipamentos que requerem energia ou corrente magnética para operarem, podendo conter elementos perigosos que oferecem risco tanto à saúde humana quanto ao meio ambiente (ARAUJO *et al.*, 2020). Contudo esses elementos são de alto valor de mercado, o que justifica um investimento em gestão adequada para a devolução desses produtos ao tratamento e extração de valor (GOMES *et al.*, 2020). Xavier *et al.* (2020) estabeleceram um sistema de classificação dos REEE, em oito categorias principais, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3. Classificação dos REEE

Categoria	Descrição e Exemplos
Eletrodomésticos	Refrigeradores (geladeiras), secadoras de roupa, fogões, lavadoras, fornos elétricos, fornos de microondas, aparelhos de ar-condicionado, <i>freezers</i> horizontais e verticais, frigobares, lava-louças, entre outros.
Eletroportáteis	Batedeiras, secadores de cabelo, liquidificadores, furadeiras, aspiradores de pó, ferros elétricos, cafeteiras, aquecedores, centrífugas, máquinas de costura, máquinas de escrever, vaporizadores, câmeras fotográficas analógicas, ventiladores, barbeadores, multiprocessadoras, torradeiras, ferramentas, brinquedos, rádios comunicadores, etc. Componentes de áudio, projetores, filmadoras, aparelhos de VHS, DVD, <i>Blu-ray</i> , aparelhos de som e <i>home-theaters</i> e outros.
Monitores	Monitores e telas do tipo Tubo de Raios Catódicos (CRT), Telas de Cristal Líquido (LCD), monitores de LED e outros. Encontrados em aparelhos de TV, computadores, jogos eletrônicos, etc. Os monitores podem ser feitos de vidro (geralmente os mais antigos) ou de polímeros plásticos, como é o caso das telas mais modernas. Os monitores, de modo geral, configuram como uma categoria à parte, por possuírem especificidades quanto aos procedimentos de transporte, desmontagem e reaproveitamento de materiais.
Informática e Telecomunicações	Computadores <i>desktops</i> , <i>notebooks</i> , periféricos, fax, tablets, impressoras, <i>iPods</i> , celulares, secretárias eletrônicas, placas de circuito integrado, reatores, discos rígidos, fitas de backup, copiadoras, gravadores de CD, DVD e VHS, <i>plotters</i> , <i>scanners</i> , terminais de caixa, terminais inteligentes, unidades de armazenamento externo, roteadores, cartuchos de tinta, toners, acessórios, mídias, PABX, modems, MP3 <i>players</i> , <i>netbooks</i> , <i>smartphones</i> , teclados, mouse, câmeras fotográficas digitais, videogames, videokes, microfones, calculadoras, fones de ouvido, etc.
Fios e cabos	Os fios e cabos são condutores elétricos, ou seja, designados como um corpo formado de material condutor e destinado primordialmente à condução de corrente elétrica. O cobre e o alumínio são os dois metais mais usados à fabricação dos condutores elétricos e, em razão do alto valor de mercado, são coletados por diferentes agentes interessados em sua comercialização.
Pilhas e baterias	Pilha é um dispositivo eletroquímico que tem a capacidade de converter energia química em energia elétrica. As pilhas e baterias são utilizadas no funcionamento de equipamentos eletrônicos. No entanto os procedimentos de descarte ainda não estão bem difundidos. O processo de recuperação de baterias automotivas encontra-se bem estabelecido.
Lâmpadas	As lâmpadas podem ser encontradas, em diferentes formatos e constituições, que resultam em materiais diferenciados a serem reciclados para cada produto. As lâmpadas que possuem vida útil curta são descartadas com maior frequência. São os estabelecimentos industriais, empresariais e comerciais os responsáveis pelo maior consumo e descarte de lâmpadas. Tipos de lâmpadas: fluorescentes clássicas, fluorescentes compactas,

	lâmpadas de sódio, lâmpadas de mercúrio, lâmpadas incandescentes.
Painéis Fotovoltaicos	Um módulo (painel) fotovoltaico é composto por células fotovoltaicas conectadas para a geração de energia elétrica a partir da luz solar. As células fotovoltaicas podem ser de diferentes tipos e componentes. Os materiais recuperados, na reciclagem desses painéis, em geral, são: alumínio, vidro, prata, cobre, plástico, silício e telúrio.

Fonte: Xavier *et al.* (2020).

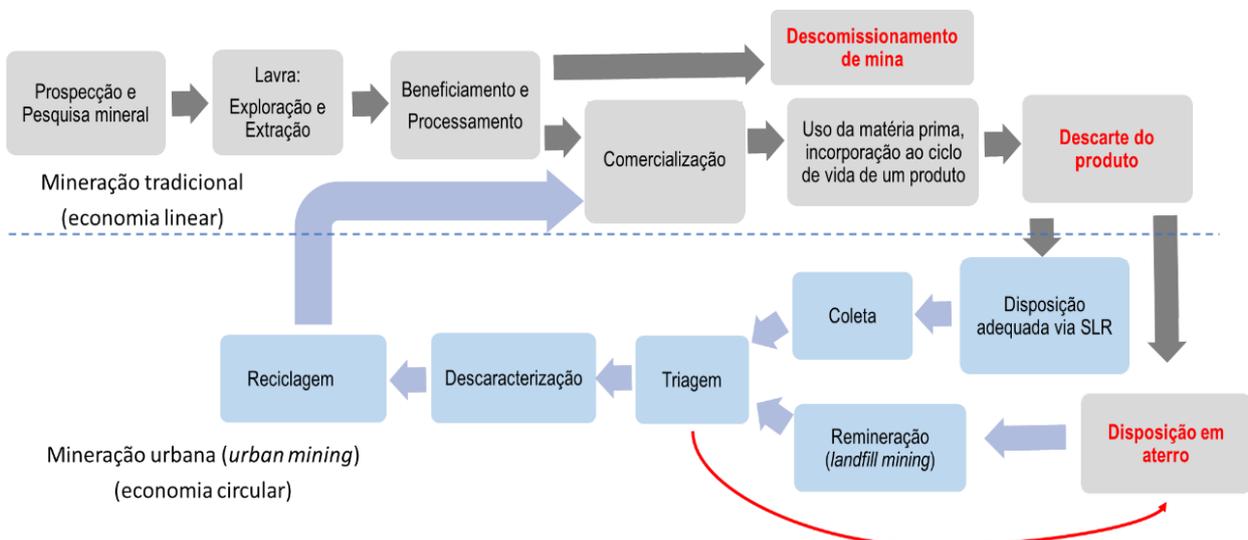
Importante ressaltar que a etapa de descaracterização (vide Quadro 2) corresponde ao estágio, em que as matérias-primas serão separadas, para que, na sequência, passem pelo processo de reciclagem e retornem como matérias-primas ao ciclo produtivo. Para Xavier & Lins (2018), a fração não reciclada dos REEE gerados no mundo apresenta destino oficialmente desconhecido, sendo possível estar disposta em aterros, comercializada clandestinamente ou reciclada imprópriamente, sem os devidos cuidados ambientais.

Apesar de ser o caminho, para um futuro mais sustentável, a mineração urbana também possui alguns desafios. Entre eles, cabe ressaltar: a destinação correta do resíduo eletroeletrônico desde o seu descarte por parte do consumidor; a escala de produção dos eletroeletrônicos, impactando diretamente na geração dos REEE; composição e formas diversas dos produtos eletroeletrônicos, tornando complexa a logística reversa e tratamento dos diferentes fluxos de materiais; e regulamentação específica, em especial, no que tange à necessidade de mecanismos punitivos mais severos ao mercado informal e incentivos econômicos à cadeia formal de reciclagem.

2.5. Mineração primária versus mineração secundária

Os limites conceituais entre mineração primária e secundária foram ilustrados na Figura 1, que mostra as principais etapas de cada um desses processos.

Figura 1. Etapas e definições dos limites entre a Mineração Primária e Mineração Secundária



De acordo com a Figura 1, a mineração tradicional (primária) engloba etapas desde a prospecção até processamento e recuperação mineral, enquanto a mineração urbana (secundária) consiste nos processos, a partir da coleta dos resíduos, passando pelo seu processamento (triagem, descaracterização, reciclagem) para a recuperação dos materiais.

O potencial de recuperação de valor a partir de recursos secundários é um processo complexo e influenciado por indicadores econômicos, sociais, ambientais e ainda por instrumentos legais e normativos que orientam as políticas públicas de um determinado país ou região. Por este motivo, a mineração secundária, apesar de utilizar processos bem difundidos de recuperação de materiais da mineração convencional, ainda exige uma maior diversidade de indicadores para uma efetiva tomada de decisão. A recente estruturação de políticas públicas que convergem interesses relativos à gestão de resíduos e ao processamento de materiais podem beneficiar novos modelos de negócio baseados nos princípios da economia circular, bem como pautados nos objetivos do desenvolvimento sustentável.

O Quadro 4 descreve os detalhes envolvidos em cada etapa das duas abordagens de forma comparativa, no qual pode-se observar que as duas categorias da mineração, muito embora objetivem a exploração mineral, apresentam diferenças importantes, principalmente com relação à fonte de matéria-prima de cada mineral. Enquanto a mineração tradicional é realizada em minas virgens naturais, a mineração urbana ocorre nos fluxos urbanos de resíduos, estando diretamente relacionados a variáveis antrópicas, como o Produto Interno Bruto (PIB), Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), renda e particularidades geográficas, entre outros (Gomes *et al.*, 2020).

Quadro 4. Comparação entre mineração tradicional e urbana segundo seus estágios e principais destaques

Mineração Tradicional		Mineração Urbana	
Estágios	Destaques	Estágios	Destaques
1. Prospecção	Área Específica	1. Descarte	Geração difusa de REEE
2. Pesquisa e exploração Mineral	Viabilidade econômica da mineração	2. Coleta	Etapas críticas e de custo mais elevado, devendo ser realizadas o mais breve possível após o descarte
3. Planejamento de mina		3. Armazenamento	
4. Produção / exploração mineral	Extração de minérios	4. Pré-processamento	Etapas para verificar a viabilidade econômica da mineração urbana
5. Processamento de minério	Processos físicos	5. Destinação	
6. Recuperação mineral	Refino do minério (físico e químico)	6. Consolidação	
		7. Recondicionamento	Processos físicos
		8. Reciclagem	Extração de minérios

Fonte: Adaptado de Gomes *et al.* (2020).

Outro ponto de destaque diz respeito ao momento da confirmação da viabilidade econômica da mineração. No caso da mineração tradicional, como apontado no Quadro 4, torna-se possível dizer se explorar determinada mina seria economicamente vantajoso, nas fases de pesquisa e exploração mineral e no planejamento da mina. Já no caso da mineração urbana, essa verificação só é possível, em fases mais avançadas, como já no momento do pré-processamento, destinação do resíduo para a opção mais adequada de tratamento e recuperação de valor e consolidação de carga, dado que, nas etapas anteriores de descarte, coleta e armazenamento, não se sabe com exatidão quanto de valor os resíduos coletados possuem, especialmente no caso dos REEE, já que são multimateriais, complexos e de variados tipos. Esse valor, estimado em termos de composição da fração metálica e não metálica, só é descoberto com precisão, após o desmonte e outras etapas do pré-processamento, sendo refinado nas etapas posteriores.

2.6. Conclusões

O REEE é o resíduo que mais cresce no Brasil e em todo mundo por causa do alto consumo de produtos eletroeletrônicos e por sua obsolescência programada, podendo apresentar variada gama de substâncias tóxicas ao ser humano e ao meio ambiente, mas que, por outro lado, contém metais economicamente valiosos, como é o caso do ouro.

Enquanto a mineração primária produz grandes impactos ambientais e à saúde humana de forma direta, a mineração secundária vem com uma alternativa para mitigar os impactos da exploração dos recursos naturais e do potencial de contaminação, advinda da gestão inadequada de resíduos gerados nos sistemas antrópicos, muito embora ainda possua alguns desafios para a sua completa adesão tanto pelo mercado quanto pelos consumidores e governo. Apesar da gestão de resíduos ainda demandar avanços estruturais, em variados países emergentes, cabe destacar a urgência de medidas, para melhorias nos sistemas de logística reversa, como instrumentos da mineração secundária, que, por sua vez, corroboram para impulsionar a economia circular, a partir da recuperação de valor dos resíduos e preservação dos estoques de matéria-prima de fontes naturais. Para a concretização de tais medidas, ressalta-se a necessidade de desenvolvimento de estudos voltados para o barateamento das técnicas de mineração secundária e aumento de eficiência da cadeia reversa, reduzindo, especialmente, os custos logísticos e outros gargalos.

Referências

ARAUJO, R.; CUGULA, J.; APOLONIO, L.; GOMES, C. F. M. S.; OTTONI, M.; XAVIER, L. H., 2020b. Spatial distribution analysis of e-waste Voluntary Delivery Points (VDP) by Green Eletron manager in São Paulo city (SP, Brazil). 5th Symposium on Urban Mining And Circular Economy (SUM 2020).

COSSU R, WILLIAMS ID, 2015. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Manag.* 45:1-3. doi: 10.1016/j.wasman.2015.09.040. PMID: 26505691.

CUGULA, J.S., APOLONIO, L., ARAUJO, R., OTTONI, M., XAVIER, L.H., 2020. E-waste hotspots and best routes analysis for reverse logistics in the city of São Paulo, Brazil. 5th Symposium on Urban Mining and Circular Economy, Venice, Italy.

GOMES, C. F.; OTTONI, M.; XAVIER, L. H., 2020. Traditional Mining and Urban Mining: Aspects of E-Waste Management in Brazil. SUM 2020/ 5TH SYMPOSIUM ON URBAN MINING AND CIRCULAR ECONOMY / 18-20 MAY 2020 / BOLOGNA, ITALY.

HARTMAN, H.L.; MUTMANSKY, J. M., 2002. Introductory mining engineering. 2002

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, 2013. Terras Raras: 3ª Audiência Pública conjunta entre CCT e a CCTSTTR. Disponível em: http://www.senado.leg.br/comissoes/cctsttr/ap/AP20130606_MarceloRTunes.pdf (acesso em 24. Abr. 2021)

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração, 2020. Políticas Públicas para a Indústria Mineral. Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 124p. Disponível em: https://portaldaminerao.com.br/wp-content/uploads/2020/11/PP_Ind_Mineral_WEB_final-1.pdf (acesso em: 24. Abr. 2021).

KHALIQ, A., RHAMDHANI, M.A., BROOKS, G., MASOOD, S., 2014. Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes: A review and Australian perspective. Resources 3, 152-179. <https://doi.org/10.3390/resources3010152>

KIM S.S., XU X., ZHANG Y., ZHENG X., LIU R., DIETRICH K.N., REPONEN T., XIE C., SUCHAREW H., HUO X., CHEN A., 2020. Birth outcomes associated with maternal exposure to metals from informal electronic waste recycling in Guiyu, China. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105580>

LEDERER, J., LANER, D., JOHANN FELLNER, J., 2014. A framework for the evaluation of anthropogenic resources: the case study of phosphorus stocks in Austria. Journal of Cleaner Production 84, 368-381. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.078>.

LI B.; DU H.Z.; DING H.J.; SHI M.Y., 2011. E-Waste Recycling and Related Social Issues in China. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.434>

MCCARTHY, A., BÖRKEY, P., 2018. Mapping support for primary and secondary metal production. OECD Environment Working Papers 135, OECD Publishing.

NICOLAI, F.N.P., 2016. Mineração urbana: avaliação da economicidade da recuperação de componentes ricos em Au a partir de resíduo eletrônico (e-waste). Tese Doutorado. UFOP - CETEC - UEMG

OTTONI, M., DIAS, P., XAVIER, L.H., 2020. A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. Journal of Cleaner Production 261, 120990. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990>

SERRANTI, S., DI MAIO, F., REM, P., BONIFAZI, G., 2012. Innovative Technologies and processing architectures in Urban Mining: two key issues to ensure secondary raw materials supply. In: Cossu, R., Sarieli, V., Bisinella, V. (Eds.), Urban Mining: A Global Cycle Approach to Resource Recovery from Solid Waste. CISA Publisher, Padova, pp. 23-47.

SINGH, P.K.; SINGH, R. S., 2016. Environmental and Social impacts of mining and their mitigation. National Seminar ESIMM-2016, 17-29.

WALLSTEN, B., CARLSSON, A., FRÄNDEGÅRD, P., KROOK, J., STEFAN SVANSTRÖM, S., 2013. To prospect an urban mine – assessing the metal recovery potential of infrastructure “cold spots” in Norrköping, Sweden. *Journal of Cleaner Production* 55, 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.041>.

XAVIER, L.H., LINS, F.A.F., 2018. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral* 379, 22-26. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/images/periodicos/2018/mineracao-urbana.pdf>. Acesso em: 04. Jan. 2021

XAVIER, L.H., GIESE, E.C., RIBEIRO-DUTHIE, A.C., LINS, F.A.F., 2019. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy*, 101467. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>

XAVIER, L.H., OTTONI, M. S.O., ARAUJO, R.A., CUGULA, J.S., CONTADOR, L., PETRUNGARO, G.N., ABREU, L. P. P., SANTOS, L.A., REBELLO, R.Z., L.P.P, GOMES, C.F., SIERPE, R., MANÇANO, M.R., CARDOSO, E.R., ROMAY, K.V.M., SUEMITSU, W., CALDAS, M.B. Manual de destinação de resíduos eletroeletrônicos. Orientações à sociedade sobre como dispor adequadamente os resíduos eletroeletrônicos no estado do Rio de Janeiro. 3ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI 2020.

ZENG, X., MATHEWS, J.A., LI, J., 2018. Urban mining of e-waste is becoming more cost-effective than virgin mining. *Environmental Science and Technology* 52, 4835-4841. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04909>



CAPÍTULO 3

MINERAÇÃO URBANA: Estado da arte e perspectivas

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ
Mestre e Doutora pela Engenharia de Produção
COPPE/UFRJ
Pesquisadora Titular no CETEM/MCTI

Leonardo Abreu

Graduando em Engenharia de Materiais pela UFRJ
Bolsista do projeto DATARE - CETEM/MCTI

Marianna Ottoni

Engenheira Ambiental pela UFRJ
Mestre pelo Programa de Planejamento Energético
- COPPE/UFRJ

3.1. Introdução

A mineração urbana, enquanto uma das ferramentas para a estruturação de processos e modelos de negócio, baseados na economia circular, tem se consolidado ao longo das últimas duas décadas. Mesmo sendo um conceito bastante recente, responde à crescente demanda por técnicas alternativas para a obtenção de recursos e redução dos impactos de extração a montante na cadeia produtiva. Como discutido, ao longo dos capítulos do livro, a gestão de produtos e materiais pós-consumo têm significativa importância à consolidação de soluções sustentáveis, para a gestão de materiais, energia e produtos. Dessa forma, propostas, como a logística reversa, a remanufatura, a reciclagem e outras, contribuem para uma gestão eficiente na fase que denominamos, ainda no Capítulo 1, como etapas a jusante da cadeia produtiva. A mineração urbana, por sua vez, apresenta a versatilidade de contribuir também a jusante, no entanto se valendo de estratégias e tecnologias usualmente utilizadas na extração de recursos a montante da cadeia produtiva.

O conceito de mineração urbana foi proposto, a partir da possibilidade de obtenção de matéria-prima secundária, oriunda de fontes antropogênicas, em depósitos prioritariamente urbanos. Os primeiros autores a abordar o tema foram Krook et al (2002, 2004), uma equipe de pesquisadores suecos que discutiram sobre a recuperação de substâncias poluentes a partir de madeira residual. Após esses trabalhos iniciais, diversos outros autores (Arora et al., 2020; Gidarakos e Akcil, 2020; Piao et al., 2021) ampliaram as possíveis aplicações, para a mineração urbana, incluindo análise de casos em segmentos, como recuperação de materiais, a partir de resíduos de áreas construídas, resíduos de pavimentação e resíduos eletroeletrônicos. Há ainda estudos que priorizam a recuperação de materiais, a partir de áreas de aterros (Zee et al., 2004; Daigo et al., 2009; Zhou et al., 2014; Somani et al., 2020), sendo talvez a maior aplicação da mineração urbana no momento e com grande potencial para a recuperação de materiais plásticos secundários, ou pós-consumo, de diferentes tipologias e em várias partes do mundo. Desta forma, a mineração urbana também tem sido considerada como mineração secundária.

Os estudos conduzidos pela equipe da Suécia avançaram por duas décadas e cunharam as principais terminologias hoje utilizadas nessa área de estudo, como mineração de aterros (*landfill mining*), recuperação de recursos (*resources recovering*) e pontos frios (*cold spots*). Esse grupo de autores ainda ressignificou o termo fluxo de materiais (*material flow*), originalmente apresentado na ecologia, propondo a recuperação de matéria-prima secundária com a consolidação de fluxos reversos de produtos e materiais pós-consumo.

O conceito de análise de fluxo de materiais se vale de uma importante ferramenta, conhecida como a análise do fluxo de materiais, que possibilita o estudo detalhada dos fluxos de entrada, processamento e saída de materiais em diferentes sistemas produtivos. Essa ferramenta tem sido amplamente aplicada em cadeias de suprimento com a vantagem de permitir a identificação do potencial de recirculação de materiais e energia, bem como a comparação da eficiência em processos industriais pré-estabelecidos e avaliar a possibilidade de recuperação de matéria-prima secundária.

Outras ferramentas, como balanço de massa, potencial de reciclabilidade, índice de circularidade e avaliação do ciclo de vida também podem ser aplicados com a finalidade de análise do potencial de mineração urbana de determinado material ou cadeia produtiva. Cada ferramenta implica especificidades a serem avaliadas, caso a caso, em conformidade com as metas pretendidas, disponibilidade de insumos na área de estudo, capacidade de processamento e valores praticados pelo mercado. Uma equação que não é simples, porém necessária para a estruturação de estratégias de exploração de matéria-prima secundária.

Se, por um lado, no processo produtivo tradicional, podem-se estabelecer os volumes, preços e prazos para a disponibilidade de insumos a serem processados, na logística reversa, o nível de incerteza ainda é muito alto em razão da imprevisibilidade da disponibilidade e qualidade dos insumos (matéria-prima secundária). Desta forma, o custo de instalação de unidades de recuperação de material, a partir de insumos secundários, além dos critérios logísticos e financeiros, usualmente, empregados para as unidades de processamento primário, deve levar em conta ainda requisitos relativos à regulamentação e aos mecanismos de mercado como pontos estratégicos para se reduzir a incerteza do segmento.

A seguir, será explorada a técnica de MFA, como uma das ferramentas com potencial para a aplicação no segmento de recuperação de matéria-prima secundária, segundo o conceito da mineração urbana.

3.2. Análise do fluxo de materiais

A análise de fluxo de materiais (do inglês, *material flow analysis* - MFA) é uma ferramenta de apoio, para o gerenciamento de materiais que fornecem a base para a quantificação, avaliação, melhoria ou planejamento estratégico, um método bem aceito e aplicado, na gestão de resíduos eletroeletrônicos (Tran et al., 2018; Meester et al., 2018; Mohammadi et al., 2021). De forma sintética, o MFA consiste em uma avaliação sistemática dos fluxos de materiais e estoques, com base no princípio do balanço de massa, considerando-se os limites do espaço e tempo.

As aplicações desse método são bastante diversificadas e permitem, inclusive, a elaboração de análises à estimativa de geração de resíduos. Em estudo recentemente coordenado pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM/MCTI) (PEITER et al., 2020), foi possível a análise do fluxo do nióbio, em diferentes cadeias produtivas e, desta forma, identificar tanto a aplicação do material, em diferentes processos produtivos, como também identificar potencial de recuperação e recirculação (Figura 1).

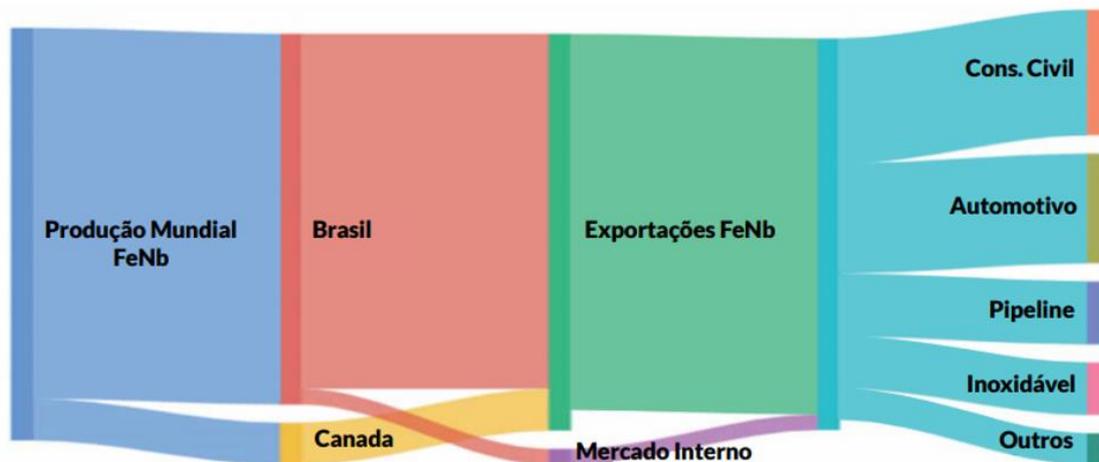


Figura 1. Esquema genérico do fluxo de materiais na cadeia produtiva do nióbio.

Fonte: Peiter et al. (2021).

A partir do esquema representado na Figura 1, por exemplo, é possível verificar a participação expressiva do Brasil na obtenção do nióbio a partir de reservas naturais. Estima-se que 71% do nióbio consumido na Europa são oriundos do Brasil, onde se encontram 90% das reservas mundiais de nióbio, que configura como um material crítico. Mais de 80% do nióbio produzido são usados em ligas que vão desde aços estruturais, para setores automotivo e construção civil, até superligas projetadas, para suportar altas temperaturas, em ambientes extremamente corrosivos, como aplicações em estruturas marítimas e aeroespaciais (Alves e Coutinho, 2015; Bruziquesi et al., 2019). Omar e Veiga (2021) também destacam o uso crescente de ligas de ferronióbio na produção de carros elétricos.

Desta forma, a representação do MFA, na Figura 1, possibilita uma análise ampla do fluxo do FeNb e, ao final, sua aplicação em diferentes cadeias produtivas. Da mesma forma, pode-se proceder ao detalhamento da cadeia produtiva dos equipamentos eletroeletrônicos, evidenciando o potencial da recuperação de materiais. O estudo publicado no *Global E-waste Monitor* (Forti et al., 2020) apresenta o potencial de recuperação de valor, a partir da mineração urbana de resíduos eletroeletrônicos (REEE), como ilustrado nas Tabela 1 e 2.

Tabela 1. Principais metais nos REEE e seu potencial valor de mercado em 2019

Material / Substância	Quantidade no REEE (kt)	Valor potencial (milhões USD)
Ferro/Aço	20.466	24.645
Cobre	1.808	10.960
Alumínio	3.046	6.062
Ouro	0,2	9.481
Prata	1,2	579
Paládio	0,1	3.532
Antimônio	76	644
Cobalto	13	1.036
Total	25.410	56.939

Fonte: Adaptado de Forti et al. (2020).

De uma forma geral, observa-se a predominância do ferro e aço como materiais presentes, em maiores quantidades, em termos de peso nos REEE e, por isso, correspondendo aos maiores potenciais de valor. Contudo, mesmo em pequenas quantidades em relação ao peso, o ouro destaca-se por seu alto valor de mercado e consequente contribuição, no valor geral dos REEEs, como apontado pela Tabela 1.

Tabela 2. Fração mássica de metais para diferentes tipos de REEE

REEEs	Fe (%p)	Cu (%p)	Al (%p)	Pb (%p)	Ni (%p)	Ag (mg/kg)	Au (mg/kg)	Pd (mg/kg)
Sucata de placa de TV	28	10	10	1	0,3	280	20	10
Sucata de placa de PC	7	20	5	1,5	1	1000	250	110
Sucata de celular	5	13	1	0,3	0,1	1380	350	210
Sucata de áudio portátil	23	21	1	0,14	0,03	150	10	4
Sucata de DVD player	62	5	2	0,3	0,05	115	15	4
Sucata de Calculadora	4	3	5	0,1	0,5	260	50	5
Sucata de Placa-mãe de PC	4,5	14,3	2,8	2,2	1,1	639	566	124
Sucata de Placas de Circuito Impresso	12	10	7	1,2	0,85	280	110	-
Sucata de TV (sem CRTs)	-	3,4	1,2	0,2	0,038	20	<10	<10
Sucata de PC	20	7	14	6	0,85	189	16	3
Sucata eletrônica comum	8	20	2	2	2	2000	1000	50
Placas de Circuito Impresso	5,3	26,8	1,9	-	0,47	3300	80	-
Sucata Eletrônica (amostra de 1972)	26,2	18,6	-	-	-	1800	220	30
REEE misto	36	4,1	4,9	0,29	1	-	-	-

Fonte: Adaptado de Cui e Zhang (2018).

A Tabela 2 destaca o potencial de recuperação de valor, a partir de diversos tipos de sucata eletrônica, ressaltando as placas de circuito impresso como maiores fontes de prata e cobre, e os celulares como produtos com alta concentração de paládio. As placas-mães de computadores foram identificadas com as portadoras de maiores concentrações de chumbo, e as sucatas de DVD player foram apontadas como maiores fontes de ferro a partir do estudo de Cui e Zhang (2018).

3.3. Identificação e recuperação de matéria-prima

A mineração urbana tem sido contemplada na literatura científica como mineração secundária, um contraponto à mineração primária ou tradicional. Conforme abordado no Capítulo 2, a mineração primária possui etapas bem estruturadas e sequenciais e permite a estimativa da viabilidade econômica, em suas etapas iniciais, enquanto a mineração urbana ou secundária apenas permite a análise de econômica a partir da triagem e caracterização da composição dos lotes de materiais.

No caso específico da gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, a mineração urbana ainda ocorre de forma bastante incipiente no Brasil. Uma parte significativa dos resíduos com

potencial econômico segue para fins de exportação, reduzindo a eficiência dos processos implementados no país. Com o objetivo de ampliar as possibilidades de alinhamento de estratégias e regulamentações sobre a gestão dos resíduos, a partir da mineração urbana, aprofundamos o detalhamento dos conceitos e as principais técnicas disponíveis para a exploração dos materiais secundários.

3.3.1. Definições e estudos sobre mineração urbana

A recuperação de matéria-prima secundária pode ser realizada, a partir de diferentes fontes, priorizando-se as de origem residual. No entanto, ainda, há alguma sobreposição na definição dos conceitos que tratam o aumento no uso de recursos não renováveis, o comprometimento no fornecimento de matérias-primas específicas e o impacto do descarte de resíduos. Nesse sentido, Cossu e Williams (2015) propuseram definições-chave para buscar convergência entre os principais conceitos relacionados à economia circular, conforme apresentado a seguir:

- i. *Mineração de aterro*: atividades envolvendo a extração e processamento de materiais residuais estocados em tipos específicos de depósitos como aterros sanitários ou resíduos de mineração, entre outros;
- ii. *Mineração urbana*: amplia a mineração de aterros para o processo de recuperação de compostos e elementos de outras fontes como resíduos de demolição e construção civil, esgoto sanitário, resíduo industrial, cinzas de incineração, produtos (em e fora de uso) e demais fontes antropogênicas;
- iii. *Reciclagem de materiais*: tem como objetivo a transformação de materiais com o propósito de manufatura de novos produtos. Os materiais recuperados, após o processamento (não necessariamente extração), são reintroduzidos em ciclos de produção;
- iv. *Recuperação de recursos*: inclui a recuperação de materiais e energia, a partir do tratamento e gerenciamento dos resíduos, a partir das técnicas de recircularidade como reúso, recondiçãoamento, remanufatura, reciclagem e outros;
- v. *Minimização de resíduos*: busca transformar resíduos recuperados em materiais que podem ser reinseridos em cadeias produtivas. Os materiais recuperados, após processamento (não necessariamente implicando um processo de extração), são reintroduzidos em ciclos de produção;
- vi. *Economia circular*: é baseado em modelos de negócios que rejeitam a abordagem linear "take-make-waste". O objetivo consiste em manter os produtos em uso por mais tempo, reutilizando e reparando-os, reduzindo a geração de resíduos, bem como o uso de matérias-primas secundárias em ciclos de produção à geração de trabalho.

A partir desses conceitos, é possível ampliar o entendimento a respeito das soluções, para a gestão sustentável dos recursos secundários, bem como alinhamento de estratégias e políticas públicas que busquem mitigar impactos e ampliar oportunidades. Alguns estudos e casos práticos permitem a aplicação desses conceitos.

Em 2013, Wallsten et al. (2013), membros da mesma equipe de pesquisadores suecos, conduzida pelo pesquisador J. Krook, introduziram o conceito de "*cold spots*", ou pontos frios, para identificar áreas nas quais se encontravam recursos com potencial de recuperação de cobre, a partir, nesse caso, de

cabos subterrâneos de transmissão de energia inativos. Segundo o estudo, o custo para minerar matéria-prima secundária, em áreas urbanas, a partir dos cabos subterrâneos inativos, apesar de muito alto, ainda seria mais viável que a extração em minas convencionais. Uma possibilidade identificada no estudo seria a condução de ações de recuperação dos cabos inativos, a partir de operações programadas de manutenção de infraestrutura, como, por exemplo, de redes de esgoto – desta forma, o custo seria incrivelmente reduzido para a prática da mineração urbana.

Entre os critérios para a definição da viabilidade econômica do processo de recuperação dos cabos, estariam: a previsibilidade do tipo e quantitativo de material a ser recuperado e a possibilidade de recuperação em unidades de processamento próximas às áreas de extração, sendo esses dois dos mais importantes critérios para se reduzir a incerteza e aumentar a previsibilidade nos processos de extração mineral. No caso estudado, cabe ressaltar que o cobre é um dos metais com maior valor agregado a ser recuperado a partir de fontes secundárias.

3.3.2. Técnicas para a recuperação de materiais

A partir da mineração urbana, é possível se obter a recuperação de recursos por meio da reciclagem de materiais. Diferentes técnicas possibilitam a sua recuperação, e parte dessas técnicas são oriundas de processos minero-metalúrgicos tradicionais, como as técnicas de pirometalurgia, hidrometalurgia e outras.

A reciclagem de REEE pode ser descrita pertencendo a três grandes áreas, podendo combinar técnicas quando necessário, sendo elas: hidrometalurgia, bio-hidrometalurgia e pirometalurgia.

a) Hidrometalurgia

Na hidrometalurgia, metais desses resíduos são dissolvidos em soluções por agentes lixiviantes ácidos ou básicos (como o cianeto, ácidos sulfídrico, nítrico e sulfúrico, tiosulfato, tioureia e haleto, etc). Depois que a solução é formada, é necessário que passe por técnicas de recuperação, como eletrodeposição, eletrorefino, precipitação, cementação, extração por solvente, troca iônica e/ou adsorção para concentrar os metais (ASHIQ; KULKARNI; VITHANAGE, 2019).

b) Bio-hidrometalurgia

Bio-hidrometalurgia utiliza microrganismos, como bactérias, fungos e algas, para a extração de metais de determinado substrato, convertendo-os em sais solúveis em meio aquoso. Ela se divide em biolixiviação e biosorção. Na primeira, os microrganismos oxidam ou liberam agentes oxidantes para a solubilização dos metais. Na segunda, pelo processo físico-químico de bioacumulação, organismos não precisam estar vivos para interagirem e extraírem metais de substratos, por se tratar de um fenômeno passivo (KIDDEE et al., 2020).

c) Pirometalurgia

A pirometalurgia direciona quantidades altas de energia a processos metalúrgicos de modo a obter temperaturas elevadas, para fundir ou “queimar” materiais, de forma a reduzir e extrair metais. Esse método se divide em *smelting*, combustão e pirólise. No *smelting*, resíduos eletrônicos são alocados a uma fornalha junto com cobre ou sucata de chumbo com a finalidade de fundi-los e originar um produto fundido (contendo os metais de interesse, como Cu, Pb, Ni, Au, Ag e Pd) e uma escória (rejeito do processo). Técnicas de eletrometalurgia assim como de hidrometalurgia auxiliam a finalização do processo, de modo a concentrarem os metais de interesse dispersos no meio fundido. Na combustão

de REEes, partes orgânicas desses componentes são submetidas à incineração, a fim de se obter o metal de interesse. Quando não controlada, pode gerar a liberação de metais pesados e compostos retardantes de chama, que impactam negativamente o meio ambiente, contribuindo com sua poluição. Ao contrário da combustão, que ocorre em uma atmosfera rica em oxigênio, a pirólise ocorre em uma com baixa concentração do gás, em que ocorre a degradação térmica dos resíduos envolvidos. Diferentemente do *smelting* e combustão, na pirólise, a parte polimérica não é perdida e, sim, transformada em compostos de menor massa molecular (EBIN; ISIK, 2016).

O estudo de Awasthi e Li (2019) destacou que uma abordagem híbrida de tratamento pode oferecer uma solução sustentável e mais eficiente para a recuperação de metais pela reciclagem do um único tipo de técnica. Nesse caso, segundo os autores, a combinação entre reciclagem mecânica, incluindo desmontagem com biometalurgia se enquadraria como uma das mais promissoras opções, necessitando, contudo mais estudos para o melhoramento das técnicas e aumento de eficiência. Para Kaya (2019), a fundição é um processo energointensivo (> 1200° C), o investimento inicial e os custos de energia são muito altos. Dessa forma, a separação físico-mecânica (gravidade, magnética e eletrostática) pode garantir a separação das frações metálica e não metálica e, quando combinadas com tratamento hidrometalúrgico, oferecem uma metodologia alternativa econômica, ecológica e mais sustentável com relação à pirometalurgia.

3.4. Mineração urbana de materiais críticos

Materiais críticos são aqueles que podem servir de entrave, para o desenvolvimento tecnológico nacional, por instabilidade de fornecimento de suas matérias-primas, oriundas dos mercados e políticas internacionais. Portanto cada país está atrelado a uma lista de materiais prioritários, em função de sua posição geopolítica e estratégia de aprimoramento tecno-científico, que possuem a potencialidade de impactarem negativamente nas suas cadeias de produção. Um exemplo pioneiro da preocupação com certas matérias-primas não atenderem à demanda interna é dado pela União Europeia, que, em 2020, identificou 30 matérias-primas críticas que poderiam gerar gargalos na produção e estabelecimento de tecnologias promissoras presentes nos setores de energias renováveis, mobilidade elétrica, defesa e espaço (EUROPEAN COMISSION, 2020). A sua seleção pode ser visualizada no Quadro 1.

Quadro 1. Seleção de Materiais Críticos para a UE em 2020

Antimônio	Fluorita	Magnésio	Silício metálico
Barita	Gálio	Grafita Natural	Tântalo
Bauxita	Germânio	Borracha Natural	Titânio
Berílio	Háfnio	Nióbio	Vanádio
Bismuto	Terras-raras pesados	Grupo da Platina	Tungstênio
Óxidos de Boro	Índio	Fosforita	Estrôncio
Cobalto	Lítio	Fósforo	
Carvão coqueificável	Terras-raras leves	Escândio	

Fonte: Adaptado de JRC (2020).

Além de matérias-primas metálicas contidas nessa lista, como o Cobalto e o Lítio, também há as rochas (como a Fosforita e Bauxita), minerais (como a Fluorita e a Grafita natural), entre outros. É importante recorrer a algumas terminologias da geologia para traçar um paralelo entre a mineração urbana e a mineração tradicional. Alguns termos, como minério, mineral, rocha e metal, podem ser confundidos entre si e gerar desentendimentos na troca de informações entre agentes interessados, mas é importante que suas definições estejam claras para melhor comunicação entre os setores industrial, social e acadêmico. Quando um mineral é citado, faz-se referência geralmente a um conjunto de características que determinado sólido apresenta, sendo esse:

- i) Homogêneo, de modo que suas propriedades físicas e químicas sejam uniformes por todo o seu volume ou apresentem pouca variação;
- ii) De composição química definida ou havendo variação dentro de certos limites;
- iii) Composto por elementos inorgânicos;
- iv) Constituído de estrutura cristalina ordenada (organização sistemática de seus átomos no espaço 3D);
- v) Presente na natureza, por meio de processos físico-químico-geológicos.

A grafita natural, sendo um mineral não metálico, apresenta sistema cristalino hexagonal e sua composição química é formada essencialmente por carbono (C), podendo conter impurezas. Já a rocha é a combinação de um ou mais tipos de minerais e são classificadas quanto à sua origem, sendo elas: magmática ou ígnea, sedimentar ou metamórfica (e.g. granito é uma rocha ígnea formada pelos minerais quartzo, feldspato e mica). Minério deriva do fato de um mineral presente em uma rocha possuir concentração tal que seja possível sua extração, no aspecto tecnológico, e vantajoso, no aspecto econômico. Os metais, do ponto de vista químico, são elementos eletropositivos presentes na natureza, passíveis de serem extraídos de certos minérios. Do ponto de vista da classificação dos materiais, podem ser divididos em ferrosos (e.g. aço, ferro fundido e ferro laminado) e não ferrosos (e.g. Cobre, Alumínio, Bronze, Latão, Chumbo, Estanho, Zinco, etc.) diante da presença ou não de Ferro (Fe) em sua composição.

Na Tabela 3, alguns dos resultados obtidos por Gutiérrez-Gutiérrez *et al.* (2015) são apresentados na análise de 55 amostras de quatro aterros sanitários, ao redor do Reino Unido, sendo esses depósitos de resíduos sólidos municipais e industriais. Os autores indicam que as concentrações de materiais críticos encontradas são demasiadamente baixas com relação às de minas convencionais. No entanto ressaltam que, para a mineração ser viável, é preciso que a recuperação de metais críticos esteja atrelada àqueles não críticos, mas com maior valor de mercado, como o Ouro e a Prata. Metais como o Cobre e o Alumínio não são tão valiosos, entretanto as suas altas concentrações podem reforçar a viabilidade de um modelo de negócio. A tipologia do aterro também é um fator impactante, visto que o tipo de resíduo depositado influencia na quantidade e disponibilidade de elementos encontrados, sendo assim, aterros somente de resíduos industriais devem conter maiores concentrações de metais críticos.

Tabela 3. Média de concentração de alguns dos metais encontrados em aterros, ao redor do Reino Unido, em comparação com a obtida em minas convencionais

Metais		Aterros	Mina Convencional
		mg/kg	mg/kg
Terras-raras Pesados	Y	5.64 ± 1.86	2600-180,000
	Dy	1.26 ± 0.43	430-47,000
	Sc	2.92 ± 1.14	20 – 130,000
Terras-raras Leves	La	8.98 ± 2.61	18,000 – 300,000
	Ce	20.43 ± 6.54	1600 – 33,000
	Nd	1.93 ± 0.58	690 – 16,000
	Pt	0.02 ± 1.78	2 – 4
Grupo da Platina	Pd	0.59 ± 0.39	2 – 7
	Ru	0.002 ± 0.004	0.3 – 0.7
	Li	19.55	–
Outros	Sb	9.04 ± 6.15	27000
	Co	12.11 ± 6.06	500 – 3000
	Al	14768 ± 5021	20 – 130,000
Valiosos	Cu	1468 ± 2539	5000 – 20000
	Au	0.15 ± 0.25	5 – 30
	Ag	3.05	–

Fonte: Adaptado de Gutiérrez-Gutiérrez *et al.* (2015).

De acordo com as informações apresentadas na Tabela 3, os metais mais valiosos são comumente conhecidos como metais preciosos, incluindo Pt, Au, Pd e Ru. Segundo Gutiérrez-Gutiérrez *et al.* (2015), apesar de apenas poucas toneladas de metais do grupo da platina estimadas, a partir do estudo com quatro aterros sanitários, há uma oportunidade de receita significativa com a recuperação de aterros.

3.5. Conclusões

Portanto novos horizontes, para a extração de metais críticos, podem ser visualizados, a partir da mineração urbana, incluindo os aterros como fonte secundária de materiais de valor. O mesmo se aplica ao caso dos REEE, como promissoras e estratégicas soluções, para a redução dos impactos da

mineração tradicional e esgotamentos das reservas naturais de diversos metais e outros materiais no planeta. A gestão dos materiais críticos visa diminuir os riscos associados à cadeia de produção por meio da substituição composicional ou reciclagem. A mineração urbana é uma forma de viabilizar a reciclagem e diminuir a criticidade desses materiais.

Nesse contexto, a mineração secundária, como uma ferramenta da Economia Circular, tem um vasto espaço no âmbito acadêmico, científico e prático para investimento e desenvolvimento nos próximos anos. Para tal, cabe destacar a necessidade de aprimoramento dos sistemas de logística reversa dos resíduos, como fontes de materiais a serem recuperados, além de melhoria na eficiência e redução da periculosidade dos processos de reciclagem e recuperação de materiais para, de fato, a mineração urbana trazer impactos positivos e configurar-se como uma solução sustentável para a nova era dos sistemas antrópicos.

Referências

ALVES, A.R., COUTINHO, A.R., 2015. The Evolution of the Niobium Production in Brazil. *Materials Research*. 2015; 18(1): 106-112. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1516-1439.276414>

ARORA, M., RASPALL, F., CHEAH, L., SILVA, A., 2020. Buildings and the circular economy: Estimating urban mining, recovery and reuse potential of building components. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 154, 104581, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104581>.

ASHIQ, A.; KULKARNI, J.; VITHANAGE, M. Hydrometallurgical Recovery of Metals From E-waste. *Electronic Waste Management And Treatment Technology*, [S.L.], p. 225-246, 2019. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-816190-6.00010-8>.

AWASTHI, A.K., LI, J., 2019. An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. *Resources, Conservation and Recycling* 126, 228-239. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.014>.

BELÉM, J. Grafita. Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/grafita/>. Acesso em: 15 mar. 2021.

BRUZIQUESI, C.G.O., BALENA, J.G., PEREIRA, M.C., SILVA, A.C., OLIVEIRA, L.C.A., 2019. Nióbio: um elemento químico estratégico para o Brasil. *Quim. Nova*, Vol. 42, No. 10, 1184-1188. <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170442>

COSSU, R., WILLIAMS., 2015. Urban mining: Concepts, terminology, challenges. *Waste Management*, Vol. 45, Pp 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.09.040>.

DAIGO, I., HASHIMOTO, S., MATSUNO, Y., ADACHI, Y., 2009. Material stocks and flows accounting for copper and copper-based alloys in Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 53, 4, Pp. 208-217, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.11.010>.

EBIN, B.; ISIK, M.I. Pyrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE. *WEEE Recycling*, p. 107-137, 2016. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803363-0.00005-5>.

EUROPEAN COMMISSION. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study. Luxembourg: Publications Office Of The European Union, 2020.

GIDARAKOS, E., AKCIL, A., 2020. WEEE under the prism of urban mining, *Waste Management*, Vol. 102, Pp 950-951, <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.039>.

GUTIÉRREZ-GUTIÉRREZ, S.C., et al. Rare earth elements and critical metal content of extracted landfilled material and potential recovery opportunities. *Waste Management* (2015), <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.024>

JRC. CRMS LIST 2020. 2020. Disponível em: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6>. Acesso em: 16 mar. 2021.

KAYA, M., 2019. Waste Printed Circuit Board (WPCB) Recycling: Conventional and Emerging Technology Approach. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 1-18. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11296-2>

KIDDEE, P.; PRADHAN, J. K.; MANDAL, S.; BISWAS, J. K.; SARKAR, B. An overview of treatment technologies of E-waste. *Handbook Of Electronic Waste Management*, [S.L.], p. 1-18, 2020. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-817030-4.00022-x>.

KROOK, J., MÅRTENSSON, A., EKLUND, M. 2002. Tracking pollution sources in waste wood - A first step to integrated material flows between sectors, Recycling, close loop economy, secondary resources in International Society for Industrial Ecology Meeting.

KROOK, J., MÅRTENSSON, A., EKLUND, M. 2004. Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 41, 1. Pp 1-14, [https://doi.org/10.1016/S0921-3449\(03\)00100-9](https://doi.org/10.1016/S0921-3449(03)00100-9).

LUZ, A. B.(Ed.); LINS, F. A. F.(Ed). *Rochas & minerais Industriais: usos e especificações*. 2.Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

MEESTER, S., NACHTERGAELE, P., DEBAVEYE, S., VOS, P., DEWULF, J., 2019. Using material flow analysis and life cycle assessment in decision support: A case study on WEEE valorization in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*. Vol. 142. Pp. 1-9, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.015>.

OMAR, T., VEIGA, M.M., 2021. Is niobium critical for Canada? *The Extractive Industries and Society* 8, Issue 2, 100898. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.100898>.

PEITER, C.S., XAVIER, L.H., TRAVERSO, M., ROSSI, E., ALVARADO, L.M., CASTRO, A.A., CASTRO, F.F., 2020. Final Technical Report: Study of critical materials' production chains: opportunities and threats of the circular economy. CETEM/MCTI. Disponível em: https://cetem.gov.br/antigo/livros/item/download/3006_fd991021a998c052390e77760e82be9c. Acesso em Dezembro de 2021.

PIAO, Z., MIKHAILENKO, P., KAKAR, M.R., BUENO, M., HELLWEG, S., POULIKAKOS, L.D., 2021. Urban mining for asphalt pavements: A review. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 280, 2, 124916, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124916>.

SOMANI, M., DATTA, M., RAMANA, G.V., SREEKRISHNAN, T.R., 2020. Contaminants in soil-like material recovered by landfill mining from five old dumps in India. *Process Safety and Environmental Protection*. Vol. 137, Pp. 82-92, <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.02.010>.

TRAN, H.P., SCHAUBROECK, T., NGUYEN, D.Q., HA, V.H., HUYNH, T.H., DEWULF, J., 2018. Material flow analysis for management of waste TVs from households in urban areas of Vietnam. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 139, Pp. 78-89, <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.07.031>.

WALLSTEN, B., CARLSSON, A., FRÄNDEGÅRD, P., KROOK, J., SVANSTRÖM, S., 2013. To prospect an urban mine – assessing the metal recovery potential of infrastructure “cold spots” in Norrköping, Sweden. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 55, Pp. 103-111 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.05.041>.

ZEE, D.J., ACHTERKAMP, M.C., VISSER, B.J., 2004. Assessing the market opportunities of landfill mining. *Waste Management*, Vol. 24, 8, Pp. 795-804. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2004.05.004>.

ZHOU, C., FANG, W., XU, W., CAO, A., WANG, R., 2014. Characteristics and the recovery potential of plastic wastes obtained from landfill mining. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 80, Pp. 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.083>.



CAPÍTULO 4

OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA MINERAÇÃO URBANA DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Ricardo Sierpe Vidal Silva

Geógrafo pela UFRJ

Mestre e Doutor em Geociências PPGEQ/UFF

Bolsista PCI-DA CETEM/MCTI

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ

Mestre e Doutora pela Engenharia de Produção

COPPE/UFRJ

Pesquisadora Titular no CETEM/MCTI

4.1. Introdução

Seguramente a mineração tradicional é um dos setores básicos da economia nacional. De acordo com Farias (2007), o Brasil produz 70 substâncias, sendo 21 do grupo dos minerais metálicos, 45 do grupo dos não metálicos e quatro dos energéticos. As empresas minerometalúrgicas destinam quase toda sua produção ao mercado externo, desencadeando uma forte pressão para que elas sigam uma gestão ambiental responsável.

Desde o período de exploração colonial do território brasileiro, a busca e extração de recursos naturais tem fomentado o desenvolvimento econômico. Contudo a abordagem dos riscos ao ambiente e à saúde humana encontram-se hoje mais incluídos na visão extrativista do que estariam inicialmente. Há ainda muitos critérios a serem definidos e analisados em prol de uma gestão sustentável dos recursos.

Um exemplo importante indo nessa direção é a reciclagem de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), sendo um processo moderno, desenvolvido desde os anos 90 e que se dá por meio da recuperação de materiais metálicos ou não. Sendo assim, esses materiais deixam de ser descartados no meio ambiente e tornam-se uma fonte de matéria-prima e diminuem a pressão da exploração de recursos naturais.

Entretanto ainda há muito o que ser trabalhado no trato do REEE. De fato, a Lei nº 12.305 de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, é um marco regulador dessa atividade e, por ser uma atividade relativamente recente, serão necessários muitos esforços no que tange à gestão da logística reversa de REEE.

4.2. Impacto da mineração e uma breve análise da regulamentação

De acordo com a Lei nº 6.938 de 1981, que institui a Política Nacional de Meio Ambiente, são caracterizadas como atividade potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos minerais a extração e tratamento de minerais, a indústria de produtos minerais não metálicos, indústria metalúrgica, a indústria de material elétrico, eletrônico e comunicações, entre outros (BRASIL, 1981), classificados conforme o grau de risco, como mostrado na Tabela 1.

Da mesma forma, a Lei nº 9.605 de 1998, conhecida como a lei de crimes ambientais, em seus Artigos 44 *“Extrair de florestas de domínio público ou consideradas de preservação permanente, sem prévia autorização, pedra, areia, cal ou qualquer espécie de minerais”* e 55 *“Executar pesquisa, lavra ou extração de recursos minerais sem a competente autorização, permissão, concessão ou licença, ou em desacordo com a obtida”*: Ainda, no Art. 55 em parágrafo único. *“Nas mesmas penas incorre quem deixa de recuperar a área pesquisada ou explorada, nos termos da autorização, permissão, licença, concessão ou determinação do órgão competente”*. De acordo com o Decreto nº 6.514 de 2008, no Art. 61 está estabelecido que quem incorre nessa infração está sujeito à penalidade de pagamento de multa, após laudo de constatação, que pode variar de R\$ 5.000,00 a R\$ 50 milhões.

Tabela 1. Atividades potencialmente poluidoras

Categoria / Risco	Descrição
Extração e Tratamento de Minerais Alto	<p>Pesquisa mineral com guia de utilização; lavra a céu aberto, inclusive de aluvião, com ou sem beneficiamento;</p> <p>Lavra subterrânea com ou sem beneficiamento, lavra garimpeira, perfuração de poços e produção de petróleo e gás natural;</p>
Indústria Metalúrgica Alto	<p>Fabricação de aço e de produtos siderúrgicos, produção de fundidos de ferro e aço, forjados, arames, relaminados com ou sem tratamento; de superfície, inclusive galvanoplastia, metalurgia dos metais não ferrosos, em formas primárias e secundárias, inclusive ouro.</p> <p>Produção de laminados, ligas, artefatos de metais não ferrosos com ou sem tratamento de superfície, inclusive galvanoplastia;</p> <p>Relaminação de metais não ferrosos, inclusive ligas, produção de soldas e anodos;</p> <p>Metalurgia de metais preciosos;</p> <p>Metalurgia do pó, inclusive peças moldadas.</p> <p>Fabricação de estruturas metálicas, com ou sem tratamento de superfície, inclusive; galvanoplastia, fabricação de artefatos de ferro, aço e de metais não ferrosos com ou sem tratamento de superfície, inclusive galvanoplastia, têmpera e cementação de aço, recozimento de arames, tratamento de superfície;</p>
Indústria de Produtos Minerais não Metálicos Médio	<p>Beneficiamento de minerais não metálicos, não associados à extração.</p> <p>Fabricação e elaboração de produtos minerais não metálicos, tais como produção de material cerâmico, cimento, gesso, amianto, vidro e similares;</p>
Indústria Mecânica Médio	<p>Fabricação de máquinas, aparelhos, peças, utensílios e acessórios com e sem tratamento térmico ou de superfície;</p>
Indústria de material Elétrico, Eletrônico e Comunicações Médio	<p>Fabricação de pilhas, baterias e outros acumuladores, fabricação de material elétrico, eletrônico e equipamentos para telecomunicação e informática; fabricação de aparelhos elétricos e eletrodomésticos.</p>
Indústria de Produtos de Matéria Plástica. Pequeno	<p>Fabricação de laminados plásticos, fabricação de artefatos de material plástico.</p>

Fonte: BRASIL (1981).

Na prática, no sentido completamente oposto à pressão internacional e, em algumas vezes, até da legislação, as práticas convencionais de mineração, beneficiamento, processamento e transporte dos minérios transformam os espaços naturais, alterando significativamente as paisagens e impondo severos riscos à saúde humana e ao meio ambiente (HAWKINS *et al.*, 2006). As técnicas mais impactantes derrubam a vegetação nativa, abrem crateras irrecuperáveis, removem morros ou constroem novos, a partir da deposição dos rejeitos, os quais quando depositados em vales ou em terrenos elevados, muitas vezes, assoreiam rios, interrompem cursos d'água e nascentes e impactam a fauna e flora local podendo resultar em interferência nas interações ecológicas.

Mais recentemente, a Lei nº 12.305 de 2010, que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em seu Artigo 13, “*Para os efeitos desta Lei, os resíduos sólidos têm a seguinte classificação*”: na letra k) “*resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios*”. Já no Art. 47. “São proibidas as seguintes formas de destinação ou disposição final de resíduos sólidos ou rejeitos”: mas especificamente no inciso II “*lançamento **in natura** a céu aberto, excetuados os resíduos de mineração*”. Temos assim um arcabouço legal e regulamentador no que diz respeito aos resíduos sólidos e rejeitos de mineração.

Embora as atuais regulamentações ambientais exijam a recuperação da área (BRASIL, 1989), ela costuma ser deixada abandonada. A medida em que a vegetação de médio a grande porte é substituída por campos gramados não nativos, os solos se tornam compactados e os cursos d’água são contaminados. A drenagem ácida das minas pode causar lixiviação, liberando metais pesados que poluem o lençol freático (HAWKINS, LASHOF & WILLIAM, 2006).

Thompson e Silva (2007) mostram que a mineração tradicional “tem historicamente um grande poder de mudança e adaptação. Então temos que mudar novamente, agora considerando as questões ambientais”. Os autores levantam sérios questionamentos sobre as empresas mineradoras no Brasil estarem atrasadas ou protelando o enquadramento nas normas de licenciamento ambiental, fato que ocorre concomitante ao crescimento da mineração tradicional no país. Os autores evidenciam que “há vontade por parte das mineradoras brasileiras de obedecer às exigências”, porque elas estão com dificuldades “de entender o que precisam fazer”. Nesses mesmos autores, encontra-se uma pesquisa realizada junto às mineradoras tradicionais sobre quais são os maiores desafios ambientais e quais são as soluções adotadas para enfrentá-los. Em suma, foram ressaltados, entre outros, o desafio da dispersão aérea de material particulado, a ocupação urbana, no entorno da mineradora, o equilíbrio ambiental e a busca do desenvolvimento sustentável, evitar a contaminação do solo e dos corpos d’água, mineração em áreas de florestas nativas e unidades de conservação.

Como apontam Silva *et al.* (2009), de um lado foram criados benefícios, como a afirmação do Brasil no cenário econômico internacional, mas, por outro lado, surgiram sérias contradições sociais, econômicas e ambientais, traduzidas pela exploração inadequada de recursos minerais, relevante destruição da vegetação nativa e graves conflitos com as populações tradicionalmente instaladas. Infelizmente, podemos adicionar a esse cenário os dois acidentes gravíssimos ocorridos, com o rompimento das barragens de rejeitos localizadas nos municípios de Mariana, no ano de 2015 e Brumadinho, em 2019. Desta forma, para as atividades da mineração tradicional, existem duas temáticas de difícil conciliação: i) a vulnerabilidade natural, necessitando de ações de preservação ambiental e ii) a potencialidade socioeconômica, que demanda a utilização dos recursos naturais de forma planejada e racional.

4.3. Mineração urbana de REEE

A “mineração urbana” do REEE é apontada como uma alternativa ambientalmente viável, pois, por um lado, tem como principal característica minimizar ao máximo a existência e a permanência do REEE em depósitos, aterros sanitários, etc e, por outro, proporciona a redução da demanda por minérios da mineração tradicional. Xavier e Lins (2018) mostram que “a mineração urbana é a recirculação ou reciclagem de produtos e materiais pós-consumo, na forma de matéria-prima secundária, como forma de se minimizar os impactos ambientais, valorizar os resíduos e criar e otimizar os benefícios

econômicos em prol de um ambiente sustentável”. Sendo assim, a mineração urbana é fundamental para romper com o processo de impactação na natureza mostrado anteriormente.

Considerando-se a logística reversa, como uma etapa da mineração urbana, envolvendo a coleta e o transporte até as opções de destinação para a recuperação desses resíduos. A PNRS, especificamente no Art. 33, destaca a obrigatoriedade de tais sistemas no Brasil, sendo o REEE uma das tipologias incluídas na regulamentação:

“São obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes de” Incisos “II - pilhas e baterias; V - lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista; VI - produtos eletroeletrônicos e seus componentes” (BRASIL, 2010).

Ainda, sobre a questão ambiental, ao saltar para a ponta final do processo da mineração tradicional, lá estão os produtos industrializados que contêm em sua composição as substâncias originadas nos minérios extraídos. Destarte, é muito importante levar em consideração as relações básicas entre oferta X demanda, na qual, em teoria, existe uma relação inversamente proporcional entre as duas que irá determinar a variação do preço final das matérias-primas e produtos. Porém, ao longo do tempo, as relações sociais tornaram-se mais complexas, a ciência evoluiu, novas tecnologias foram incorporadas aos processos produtivos e o crescimento da expectativa de vida associado ao aumento da população mundial fizeram com que a sociedade demande cada vez mais por produtos industrializados.

Inclusive, Blengini *et al.* 2020 mostram que a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) prevê que a demanda global de materiais passará de 79 bilhões de toneladas, em 2020, para 167 bilhões de toneladas, em 2060. Esse cenário aponta para uma intensificação da competição global por recursos. Os autores ainda citam que a dependência de matérias-primas críticas (*Critical Raw Materials*) pode substituir a dependência atual do petróleo, nesse sentido, a UE já entende o acesso aos *critical raw materials* como uma questão estratégica e de segurança do bloco.

Logo, para atender o crescimento dessa demanda, é necessário aumentar a produção industrial, que, por consequência, necessita cada vez mais de matéria-prima, o que por séculos e ainda hoje, paralelamente a qualquer evolução tecnológica, dá-se pelo aumento da exploração mineral tradicional, assim, todas as mazelas associadas tendem a aumentar par e passo com esse processo. Agora, conexo à essa situação, existe a destinação final dos produtos industrializados, ou seja, o seu descarte após seu uso, fim do ciclo de vida ou por qual motivo for, é evidente que o aumento da quantidade dos produtos descartados é diretamente proporcional ao crescimento da produção e da demanda por matérias-primas. Essa situação se traduz por um processo de impactação na natureza, na qual ela é utilizada inicialmente como fonte de recursos naturais e minerais e, ao final, como depósito dos produtos, pós ciclo de vida, como ilustrado na Figura 1.

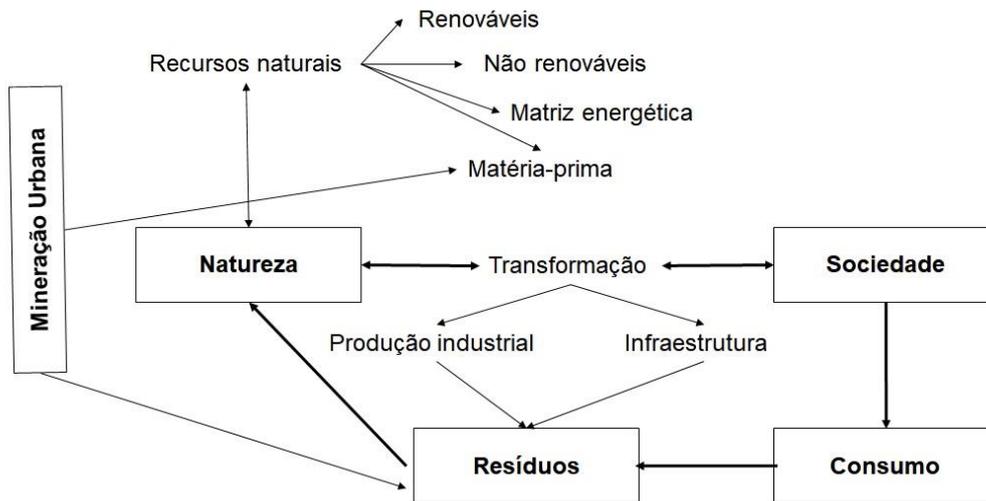


Figura 1. Intervenção da mineração urbana no ciclo de transformação da natureza

Para que esse ciclo impactante seja minimizado, surgem alternativas, como a mineração urbana. Para Lins *et al.* (2016), as jazidas tradicionais são condicionadas à formação geológica do planeta, têm localização fixa e diminuem com sua exploração que é decorrente do aumento da produção industrial. Ainda em Lins *et al.* (2016), a princípio, é importante esclarecer que as minas urbanas podem ser definidas de forma geral como a “acumulação de materiais valiosos”. Acrescenta-se a essa definição o elemento espacial, pois estão localizadas em depósitos de resíduos sólidos nas áreas urbanas. Já a “mineração urbana” é o “processo de extração desses materiais a partir de resíduos”. Sendo assim, as “jazidas urbanas” são condicionadas aos processos antrópicos e, ao contrário das tradicionais, aumentam concomitantemente com a produção industrial, além, é claro, de não estarem localizadas no subsolo.

Segundo Trombini e Gomes (2013), Lins (2016), Xavier e Lins (2018) e Forti *et al.* (2020), esses referidos resíduos são conhecidos como resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE), *waste electrical and electronic equipment (WEEE)*, ou simplesmente como *eletronic waste (e-waste)*. Ou seja, são necessariamente produtos industrializados que vão desde aparelhos celulares até geladeiras ou freezers, como apontado com mais detalhes no Capítulo 1. Atualmente, Rosa e Terzi (2016) e Schmid (2020) afirmam que os automóveis, sobretudo os híbridos e os elétricos, pelos constantes avanços tecnológicos em ecoeficiência já são alvos de estudos sobre mineração urbana e apresentam um grande potencial de recuperação dos seus materiais.

Segundo Schmid (2020), a mudança dos automóveis com motores de combustão interna (ICE), para veículos elétricos (EVs), é amparada em tecnologias inovadoras e tem uma grande demanda pelos critical raw materials. A mobilidade elétrica (*e-mobility*), por meio da conjuntura socioeconômica-ambiental atual, pautada nas oscilações do preço do petróleo, tratados internacionais para diminuição da emissão de carbono na atmosfera e o compartilhamento de veículos já é uma realidade e o mercado de veículos elétricos está se tornando mais significativo em relação ao volume de vendas e ao tamanho do mercado geral na Europa.

Para que se tenha uma ideia do quanto pode ser recuperado pela mineração urbana, Forti *et al.* (2020) mostra que, no ano de 2019, foram geradas 53,6 Mt (53,6 milhões de toneladas) de REEE, que representa uma média de 7,3 kg por habitante no planeta. O primeiro estudo desses autores foi publicado, em 2014, o segundo, em 2017 e o atual, em 2020, sendo assim, Forti *et al.* (2020) afirmam que houve um crescimento de 9,2 Mt entre os anos de 2014 até 2019. Melhor compreensão dessa distribuição de REEE pelo mundo encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Distribuição dos REEEs pelos continentes no ano de 2019.

Continente	REEE em Mt	REEE per capita em kg
Global	53,6	7,3
Ásia	24,9	5,6
América	13,1	13,2
Europa	12,0	16,2
África	2,9	2,5
Oceania	0,7	16,1

Fonte: Forti *et al.* (2020).

Para entender os benefícios da mineração urbana, além de levar em consideração o volume de REEE produzido, também é muito importante compreender o mecanismo que faz com que os resíduos não sejam depositados na natureza, o qual, por sua vez, é a Logística Reversa (LR). Para Nicolai, Lana e Loschiavo (2016), é pela LR que os REEE, seja pela reciclagem, por reúso ou pela remanufatura retornam à indústria, recomçando, a partir desse momento, o ciclo produtivo e reduzindo a necessidade de matéria-prima. Ainda, segundo Nicolai, Lana e Loschiavo (2016), atualmente já existem, em algumas indústrias, novas técnicas produtivas que levam em consideração a futura reciclagem, as quais estão relacionadas com desmonte mais eficiente, tendo em vista preservar os materiais e a opção por matérias-primas que minimizem os impactos ambientais e riscos associados à saúde humana.

Entretanto Forti *et al.* (2020) indicam um grande descompasso entre a mineração urbana e a geração de REEE, tendo em vista que dos 53,6 Mt gerados somente 9,3 Mt foram destinadas às atividades de coleta e reciclagem pelo mundo, no ano de 2019, tendo a Europa uma taxa de coleta e reciclagem de 42,5%, a Ásia 11,7%, a América 9,4%, a Oceania 8,8% e a África com 0,9% e vale ressaltar que esses dados são obtidos por meio de documentações formais. Ou seja, sobram 44,3 Mt a uma média de 6,03 kg per capita que não entram nos registros oficiais, logo sua destinação pode variar entre: i) deposição em aterros sanitários ou incineração; ii) remodelagem, reutilização para revenda; iii) deposição conjunta com outros resíduos sólidos em aterros sanitários; iv) coleta, armazenamento, desmonte e captação de materiais de forma clandestina ou sem regulamentação.

4.4. Aspectos socioambientais da mineração urbana

Forti *et al.* (2020) também ressaltam que a ausência, a falta de consolidação e a gestão inadequada do REEE, principalmente nos países subdesenvolvidos e, nos em desenvolvimento, propicia oportunidades ao crescimento das atividades informais. Neste caso, o REEE é tratado de forma errada, causando grandes riscos à saúde dos trabalhadores e da população que convivem diariamente nessas áreas.

A preocupação com os impactos ambientais decorrentes dos resíduos é um tema bem consolidado, encontra-se em Gímeno-Garcia *et al.* (1996) e em Mattschullat (2000), que, durante as últimas décadas, a contar das referidas publicações, a contaminação ambiental por elementos traços e contaminantes orgânicos (hidrocarbonetos de petróleo, agroquímicos, etc) tem se tornado tema de destaque, na comunidade científica, pelos severos danos causados ao meio ambiente e à saúde humana. Segundo os autores, as fontes antrópicas de contaminação estão diretamente relacionadas à ausência ou à gestão inadequada dos resíduos domésticos, de indústrias químicas, petroquímicas, metalúrgicas, de mineração e aplicação de agroquímicos.

De acordo com Grant *et al.* (2013), Trombini Gomes (2013), Nicolai (2016), Sun, Zeng e Li (2016), Sharma (2019), Forti *et al.* (2020), pode-se encontrar muitas substâncias diferentes nos REEEs e a sua variabilidade está diretamente relacionada às categorias dos REEEs. Entre elas, os diferentes autores convergem no sentido de que podem ser encontrados metais, semimetais, halogênios (69 elementos da tabela periódica), policloreto de vinila – PVC, bifenilospoliclorados – PCB, clorofluorcarbonetos – CFC, hidroclorofluorcarbonetos – HCFC, retardantes de chama – BFR (Brominated Flame Retardants) que são, em sua maioria, éteres difenilicopolibromados – PBDE e éteres de difenilapoliclorados – PCDE, vidros, cerâmicos e outros compostos orgânicos.

Algumas dessas substâncias são extremamente perigosas para o meio ambiente e para a saúde humana, como, por exemplo, segundo Forti *et al.* (2020), o uso de PBDE foi proibido na Europa, a partir de 2011, pois são bioacumulativos, altamente tóxicos, podendo ser responsáveis por danos aos rins, distúrbios da pele, sistema nervoso e imunológico. Os metais pesados, como mercúrio, cádmio ou chumbo também causam impactos significativos, sendo assim, Castilhos (1999) mostra que, quando o mercúrio – Hg é disposto no ambiente sofre processos biológicos e se torna metilmercúrio potencializando seus efeitos adversos por biomagnificação, inclusive, com efeitos teratogênicos observados na população ribeirinha do rio Tapajós. Já Kumar e Kumar (2019) mostram que PVC e PCB, quando incinerados de forma incorreta, podem produzir vapores perigosos e material particulado de pequeno porte, na forma de aerossóis, que podem ocasionar câncer de pulmão, de pele e a perda de fertilidade dos solos.

Ao voltar nos 44,3 Mt, tem-se um grande volume representando 82,6% de REEE com destinação desconhecida ou pelo menos não mensurável. Sendo assim, ao associar esse volume com o potencial de risco à saúde humana e ambiental, presente em alguns elementos e substâncias e, sem deixar de levar em consideração as práticas informais, é muito fácil identificar alguns desafios que são: a) contaminação dos solos, rios e águas subterrâneas que podem ser causados pelos acúmulo a céu aberto, ou pelo enterro de REEE em depósitos irregulares de resíduos sólidos; b) contaminação dos solos, animais e seres humanos pelos aerossóis decorrentes da queima sem parâmetros e técnicas adequadas; c) outras formas de contaminação ambiental e humana derivadas da manipulação incorreta, principalmente na desmontagem e acondicionamento do REEE.

Wu *et al.* (2015) estudaram a Contaminação de metais pesados em solo e água nas proximidades de um local de reciclagem de REEE abandonado na China e encontraram que o solo foi acidificado, nos locais de queimação e lixiviação ácida (aprox. pH 4), enquanto uma leve diminuição da acidificação do solo foi observada na vegetação do entorno (pH 4,82). A contaminação metálica entre os locais de amostragem indica que o local de reciclagem de REEE abandonado ainda estava contaminado, por altas concentrações de cádmio (Cd), níquel (Ni), zinco (Zn), cromo (Cr), manganês (Mn), chumbo (Pb).

Dai *et al.* (2020) mostram que a contaminação severa por compostos, semelhantes à dioxina (DLC), em áreas de reciclagem REEE, ainda, é subvalorizado com relação à saúde local. Os autores citam que altas concentrações de contaminantes de DLC, derivadas da reciclagem informal de REEE, pode aumentar a carga corporal DLC, nos trabalhadores ou residentes, principalmente crianças e bebês. Os autores apontam a necessidade de existirem ações de monitoramento constante das concentrações de DLC, até porque ainda existem lacunas significativas para informações sobre sua interação com o ser humano, a fim de promover práticas seguras no trato de REEE, contendo DLC e, assim, minimizando os impactos adversos aos seres humanos.

4.5. Conclusões

A mineração urbana é fundamental, para a sustentabilidade ambiental, por preservar as reservas naturais e reduzir as consequências negativas da destinação inadequada de resíduos e para a diminuição da pobreza, pois, ao mesmo tempo que minimiza significativamente os impactos causados pela mineração tradicional, traz benefícios, como geração de renda e empregos formais. Cabe considerar ainda as oportunidades, em termos de transdisciplinaridade da mineração urbana, em que cabem estudos sobre saúde humana, gestão de pessoas, gestão ambiental, contaminação ambiental, economia, geopolítica, segurança do trabalho, engenharia, entre outros.

Apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos potencializar os benefícios socioeconômicos, ao tornar a logística reversa de REEE uma política de Estado, ainda há muito que ser feito para melhorar os SLR. Nesse aspecto, devem ser considerados os desafios territoriais do Brasil, de proporções continentais, as variações de regulamentações estaduais, que podem dificultar o transporte interestadual desses resíduos, a falta de incentivos fiscais à cadeia reversa, além da inibição da alta informalidade do segmento e da necessidade de maior transparência quanto às metas quantitativas (em peso) de coleta e destinação adequada dos REEE pelos responsáveis pelos SLR.

Referências

BRASIL, 1981. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm. Acesso em: 19. Jan. 2021

BRASIL, 1989. Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências. Disponível em:

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1989/decreto-97632-10-abril-1989-448270-publicacaooriginal-1-pe.html>. Acesso em: 19. Jan. 2021

BRASIL, 2010. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 06. Dez. 2020.

DAI, Q., XU, X., ESKENAZI, B., ASANTE, K.A., CHEN, A., FOBIL, J., BERGMAN, A., BRENNAN, L., SLY, P.D., NNOROM, I.C., PASCALE, A., WANG, Q., ZENG, E.Y., ZENG, Z., LANDRIGAN, P.J., DRISSE, M.B., HUO, X., 2020. Severe dioxin-like compound (DLC) contamination in e-waste recycling areas: An under-recognized threat to local health. *Environment International* 139, 105731. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105731>

FARIAS, C. E. G., 2002. Mineração e Meio Ambiente no Brasil. Relatório Preparado para o CGEE – PNUD Contrato 2002/001604. Disponível em: www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf. Acesso em: 16. Jan. 2021.

FORTI V., BALDÉ C.P., KUEHR R., BEL G., 2020. 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.

GIMENO-GARCÍA E., ANDREU, V., BOLUDA R., 1996. Heavy metals incidence in the application of inorganic fertilizers and pesticides to rice farming soils. *Environmental Pollution* 92, 19-25. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(95\)00090-9](https://doi.org/10.1016/0269-7491(95)00090-9)

GRANT, K. GOLDIZEN, F.C., SLY, P.D., BRUNE, M., NEIRA, M., BERG, M., NORMAN, R.E., 2013. Health consequences of exposure to e-waste: a systematic review. *Lancet Glob Health* 2013, 1, 350–361. [http://dx.doi.org/10.1016/S2214-109X\(13\)70101-3](http://dx.doi.org/10.1016/S2214-109X(13)70101-3)

HAWKINS, D. G., LASHOF, D. A., WILLIAMS, R. H., 2006. Que fazer com o Carvão? *Revista Scientific American Brasil*. Ano 5 – Nº 53.

LINS, F.A.F., RIZZO, A.C., CUNHA, C.D., LIMA, F.M., 2016. Tecnologias para a sustentabilidade ambiental. In: *Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios* / Adolpho José Melfi, Aroldo Misi, Diogenes de Almeida Campos e Umberto Giuseppe Cordani (organizadores). – Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências.

MATSCHULLAT, J., 2000. Arsenic in the geosphere – a review. *Science of the Total Environment* 249, 297-312. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00524-0](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00524-0)

NICOLAI, F.N.P., 2016. Mineração urbana: avaliação da economicidade da recuperação de componentes ricos em Au a partir de resíduo eletrônico (e-waste). Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da Rede Temática em Engenharia de Materiais – REDEMAT. Belo Horizonte.

NICOLAI, F.N.P., LANA, S.L.B., LOSCHIAVO, M.C., 2016. O Lixo Eletrônico (E-Waste) na Mineração Urbana: design sustentável; uma responsabilidade compartilhada. Congresso Brasileiro de pesquisa e desenvolvimento em design. Belo Horizonte.

PRODANOV, C. C., FREITAS, E. C., 2013. Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale.

ROSA, P., TERZI, S., 2016. Waste Electrical and Electronic Equipments versus End of Life Vehicles: A State of the Art Analysis and Quantification of Potential Profits. *Procedia CIRP* 48, 502-507. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.145>.

KUMAR, S., KUMAR, P. T., 2019. E-waste management: A review. Conference: Society betterment, at: Jaipur Rajasthan. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336141444_E-WASTE_MANAGEMENT_A_REVIEW. Acesso em: 23. Jan. 2021

SCHMID M., 2020. Challenges to the European automotive industry in securing critical raw materials for electric mobility: the case of rare earths. *MineralogicalMagazine* 84, 5–17. <https://doi.org/10.1180/mgm.2020.9>

SILVA, R.S.V., CASTRO, S.M., CASTILHOS, Z.C., EGLER, S.G., 2009. Panorama e Desafios da Atividade Mineral na Ecorregião Aquática Xingu-Tapajós. XXIII ENTMMME – Gramado - RS.

SUN, L., ZENG, X., LI, J., 2016. Pollutants release and control during WEEE recycling: A critical review. The Tenth International Conference on Waste Management and Technology (ICWMT). *Procedia Environmental Sciences* n° 31. 2016

TROMBINI, F., GOMES, O.V.O., 2013. Reaproveitamento de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos- REEE – Uma Visão Sobre o Trabalho dos Artesãos e os Impactos Sobre a Saúde eo Meio Ambiente. IV Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Salvador/BA.

WU, Q., LEUNG, J.Y.S., GENG, X., CHEN, S., HUANG, X., LI, H., HUANG, Z., ZHU, L., CHEN, J., LU, Y., 2015. Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of The Total Environment* 506–507, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>.

XAVIER, L. H., GIESE, E. C., RIBEIRO-DUTHIE, A. C., LINS, F. A. F., 2019. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy*, 101467. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>

XAVIER, L. H., LINS, F. A., 2018. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral* 379, 22-26.



CAPÍTULO 5

ECONOMIA CIRCULAR E A GESTÃO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS

Luciana Contador

Bióloga pela UFRJ

Mestre em Ciências do Mar (USU)

Doutora em Ciências do Meio Ambiente

Universidade Paris VI

Pós doutoranda PPE COPPE-UFRJ

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ

Mestre e Doutora pela Engenharia de Produção

COPPE/UFRJ

Pesquisadora Titular no CETEM/MCTI

5.1. A agenda 2030 e o recomeço econômico

A pandemia deu início a uma grave crise econômica global em 2020. Pesquisadores e líderes de diversos países discutem a oportunidade, para um recomeço (*restart*) da economia, em um modelo circular sustentável. Entre as iniciativas mundiais colocadas, estão: a “#CleanReset” no Canadá, as novas diretrizes “EUROCITIES” da Comunidade Europeia, a “China's Great Green Reset” e a “The Great Reset” do World Economic Forum (Romano, 2020).

Apesar de impulsionadas por diferentes motivações, iniciativas como essas reconhecem que as atividades remotas, apesar das circunstâncias, resultaram em benefícios, como aumento da produtividade, redução das emissões e significativa contribuição para uma economia de descarbonização. Por isso, práticas focadas em sustentabilidade com o incentivo à transição para economias de baixo ou zero carbono e adoção de padrões de circularidade, sendo o conceito da economia circular como coluna principal da nova configuração social e econômica.

Várias questões emergem, a partir da consolidação desses entendimentos, tais como:

Que seria esse recomeço circular? Como os resíduos eletroeletrônicos podem contribuir com esse recomeço circular? Quais os impactos do aumento do consumo de equipamentos eletroeletrônicos e a projeção do pós-consumo em médio e longo prazo?

O sistema econômico atual é baseado em um modelo industrial linear de extração-produção-consumo-descarte. Esse modelo linear leva ao esgotamento dos recursos naturais, acúmulo de resíduos e crescente emissão de gases de efeito estufa. A economia circular (EC) visa redefinir o crescimento econômico, com foco em benefícios amplos para a sociedade, com uso de energia renovável, reduzindo ao máximo o consumo de recursos finitos e a geração de lixo e permitindo a regeneração dos sistemas naturais (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

A EC e a Agenda 2030 têm em comum o foco no desenvolvimento socioambiental sustentável, sendo possível considerar a EC como parte integrante da Agenda 2030, capaz de contribuir para a realização de diversos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Tanto as etapas de extensão de vida útil dos produtos, quanto a correta reciclagem de resíduos são dependentes de mão de obra humana, portanto o investimento na circularização da economia deve aumentar o número de empregos, contribuindo para a ODS 8 (emprego digno e crescimento econômico). A gestão adequada dos REEE também contribui com outros ODSs da Agenda 2030, como o ODS 3 (saúde e bem-estar); ODS 6 (água potável e saneamento) e ODS 14 (vida debaixo d'água).

Lançada, em 2015, na sede da ONU, em Nova York, a Agenda 2030, para o Desenvolvimento Sustentável, visa à erradicação da pobreza, à proteção do planeta e à garantia de paz e prosperidade para todos os povos. O compromisso foi assinado por 193 países, incluindo o Brasil e estabelece um conjunto de 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODSs) e 169 metas, a serem alcançadas, por meio de ações de âmbito internacional, nacional e local, envolvendo governos, organizações, empresas e toda a sociedade (UN General Assembly, 2015).

A agenda tem como lema ambicioso a “transformação do mundo, sem deixar ninguém para trás” e é pautada em 5 Ps:

1. Pessoas – Erradicar a pobreza e a fome e garantir a todos os seres humanos desenvolvimento com dignidade e igualdade em um ambiente saudável.
2. Prosperidade – Garantir que todos os seres humanos possam prosperar e que o progresso econômico, social e tecnológico ocorra em harmonia com a natureza.

3. Paz – Promover sociedades pacíficas, justas e inclusivas, livres de medo e violência. Não há desenvolvimento sustentável sem paz e não há paz sem desenvolvimento sustentável.
4. Parcerias – Implementar a agenda com a parceria de todas as nações, todas as partes interessadas e todas as pessoas.
5. Planeta - Proteger o planeta da degradação, incluindo consumo e produção sustentáveis, gestão sustentável dos recursos naturais e ações urgentes contra as mudanças climáticas, para as futuras gerações.

Os 17 Objetivos para Desenvolvimento Sustentável estão representados, a seguir, na Figura 1.



Figura 1. Os 17 Objetivos para Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030 (UN General Assembly, 2015)

A agenda 2030 é uma chamada para que todas as nações apresentem ações que promovam a prosperidade, enquanto protegem o meio ambiente. Para atingir as metas da Agenda 2030, muitos países estão fazendo a transição para uma Economia Circular (EC) (Quadro 1) (CANADA'S CLEAN50, 2020; CHANGHUA, 2020; CONNIE, 2020; EUROCITIES, 2020; WEFORUM, 2020).

A EC também traz como princípios a transição para energias renováveis, o respeito pela biodiversidade, o equilíbrio e a inclusão sociais, o combate às mudanças climáticas. Portanto trabalhar de modo circular ajuda a atingir a maioria dos ODSs, não como um custo da operação, mas como um modelo de negócio.

A ONU possui um fórum que acompanha anualmente as medidas e avanços obtidos por cada nação rumo à Agenda 2030, o HLPF (High-Level Political Forum). Nos últimos anos, a economia circular tem sido repetidamente mencionada nesse fórum, como uma solução fundamental, para a realização dos ODSs, incluindo ODS 6 (energia), ODS 8 (crescimento econômico), ODS 11 (cidades sustentáveis), ODS 12 (consumo e produção responsável), ODS 13 (mudança climática), ODS 14 (oceanos) e ODSs 15 (vida terrestre).

Quadro 1. Exemplos de iniciativas de economia circular no mundo

País	Ano	Iniciativa
Japão	1990	“Basic Environmental Plan” “R-CES” ou “regional and circular ecological sphere”.
Alemanha	1996	Lei de Economia Circular (“kreislaufwirtschaft”).
China	2008	Circular Economy Promotion Law.
Luxemburgo	2014	“Luxembourg Roadmap for a Circular Economy”.
Comunidade Europeia	2015	“Circular Economy Action Plan”.
Escócia	2015	“Making Things Last”.
Finlândia	2016	“Finnish Road Map to a Circular Economy (2016-2025)”.
Holanda	2016	“A Circular Economy in the Netherlands by 2050”.
França	2018	“Circular Economy roadmap of France: 50 measures for a 100% circular economy”.
Inglaterra	2018	“Our waste, our resources” (2019-2050).
Colômbia	2019	Estratégia Nacional de Economía Circular.
Equador	2019	“Pacto por la Economía Circular” “Libro Blanco de Economía Circular” (2020).
Chile	2020	“Hoja de Ruta RCD y Economía Circular en Construcción”.
Suécia	2020	Estratégia Nacional para uma Economia Circular.

O objetivo de desenvolvimento sustentável 13, combate às alterações climáticas, reconhece que as mudanças climáticas representam uma ameaça grave, urgente e potencialmente irreversível à humanidade e ao planeta. O ODS 13 se compromete com as metas do Acordo de Paris (do qual o Brasil também é signatário). As metas desse acordo são ambiciosas: manter o aumento da temperatura média global, em menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais e, preferencialmente, limitar o aumento da temperatura a 1,5°C acima dos níveis pré-industriais. Para cumprir o acordo, os países signatários têm investido na transição para energias renováveis e no desenvolvimento de tecnologias de maior eficiência energética. No entanto tais medidas abrangem somente 55% do total das emissões de GEEs, 45% das emissões estão associadas à produção de bens materiais (Ellen MacArthur Foundation, 2019). Para atingir as metas do Acordo de Paris e do ODS 13, será necessário mais do que

o uso de energias renováveis, urge uma profunda transformação nos modos de produção e consumo (ODS 12), possível pela adoção de práticas de economia circular.

O ODS 12, consumo e produção responsável, pode ser indicado como o cerne da EC. O modelo linear de produção e consumo leva ao esgotamento dos recursos naturais (solo, água, minerais). O modelo econômico circular busca a extensão da vida útil dos materiais, mantendo o produto nos níveis mais elevados da cadeia de valor, durante o maior tempo possível. Após a vida útil do produto, estratégias de reciclagem recuperam a matéria-prima, que passa a ser chamada de matéria-prima secundária. A recuperação e uso de matéria-prima secundária na produção reduz a necessidade da extração, na reserva natural, possibilitando a regeneração do ambiente e dos sistemas naturais.

A extensão da vida útil do produto pode ser obtida por reparo, reúso, reforma (upgrade), remanufatura. Dessa forma, a EC vai além dos “Rs” mais conhecidos, como reduzir, reutilizar e reciclar.

- i. Reparo – Conserto, restaurar a condição de funcionamento, com a troca de componentes quebrados ou defeituosos e retorno ao consumidor. Desmontagem não destrutiva, geração de REEE (peças danificadas inservíveis).
- ii. Reúso – Transferência de um produto usado e em funcionamento para outro consumidor.
- iii. Reforma/upgrade – Aprimoramento da qualidade do produto. Troca de componentes com algum dano estético ou obsoleto por componentes novos, mais atuais e/ou de maior qualidade (upgrade). Desmontagem não destrutiva, geração de REEE (peças obsoletas ou não reaproveitáveis).
- iv. Remanufatura – Recuperação de produto, ao final de sua vida útil e reinserção na cadeia produtiva, com as mesmas funcionalidades, especificações e garantias do produto novo. Troca de peças e componentes, desmontagem não destrutiva, com geração de REEE (peças danificadas ou não reaproveitáveis).
- v. Reciclagem – Recuperação de matéria-prima secundária, a partir da separação dos componentes. Desmontagem destrutiva. A reciclagem com alto grau de eficiência busca reduzir ao máximo os resíduos gerados, separando e purificando toda a matéria-prima secundária, para a reinserção na cadeia produtiva, por uso na fabricação de novos produtos.

O grande desafio, para essa abordagem circular no ciclo de vida de um produto, é que os produtos não são concebidos, a fim de facilitar o reparo, a reforma, a remanufatura ou mesmo a separação dos componentes à reciclagem. Até 80 % do impacto ambiental dos produtos é determinado na fase de design (Directive 2009/125/EC). Muitos produtos apresentam defeitos brevemente, após a compra e não podem ser facilmente reutilizados, reparados ou reciclados, alguns são projetados para ficarem obsoletos em pouco tempo ou para a utilização única.

Para as empresas de remanufatura e reciclagem, a falta de um sistema de logística reversa (SLR) bem estruturado é um grande entrave. Resgatar os produtos eletroeletrônicos fora de uso com o consumidor, transportar a armazenar, para reunir um volume de material que viabilize a revenda e o processamento, são obstáculos para o desenvolvimento do setor.

Para viabilizar a circularização da economia, são necessárias diversas ações e compromissos de governos, empresas e sociedade. Um ótimo exemplo de caminho, para a economia circular, é o da Comunidade Europeia (CE).

Em 2015, a Comunidade Europeia (CE) lançou o primeiro Circular Economy Action Plan, uma agenda para a construção de uma Europa mais limpa e mais competitiva, em parceria com os atores econômicos, consumidores, cidadãos e organizações da sociedade civil. Em 2019, buscando cumprir as metas da Agenda 2030, os países-membro da União Europeia lançaram o European Green Deal, uma série de propostas e políticas, para a redução das emissões de gases do efeito estufa e o incentivo ao crescimento sustentável. Esse pacto ambiental tem o apoio de grandes empresas e o suporte governamental.

Em 2020, em meio à pandemia de Covid-19, a CE lançou o novo Circular Economy Action Plan. Entre as medidas, para equipamentos eletrônicos neste novo plano, está a do direito ao reparo ("right to repair"). Os produtos eletrônicos precisam ser mais duráveis, de fácil reparo e possibilidade de upgrade, com design que promova uma reciclagem eficiente. A obsolescência precoce também é duramente reprimida. Os consumidores devem ter acesso a todas as informações sobre o ciclo de vida do equipamento, permitindo uma escolha baseada em princípios ambientais.

Ao estender a vida útil dos produtos, os processos circulares reduzem ao máximo o lixo e a emissão de GEEs e a poluição do ambiente. Finalizada a vida útil do produto, os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) devem ser reciclados para a recuperação da matéria-prima secundária e destinação adequada de rejeitos.

Outra ferramenta da economia circular é baseada na economia funcional, que prioriza o valor da função e dos serviços fornecidos por um produto acima de seu valor comercial de propriedade. Essa prática é conhecida como "**produto como serviço**" e funciona principalmente com contratos de locação. Alguns dos exemplos são o contrato de fornecimento de água filtrada pela Brastemp, cujo contratante não adquire propriedade sobre o equipamento (filtro); prestação de serviço de iluminação pela Philips Lighting; uso de softwares como serviço (SaaS ou "Software as a Service") com assinaturas de proteção antivírus ou uso de softwares, entre muitas outras.

5.2. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos e a agenda 2030

De acordo com o relatório da Universidade das Nações Unidas, Global e-waste Monitor de 2020, o mundo gerou 53,6 Mt de resíduos eletroeletrônicos (REEE) em 2019, aproximadamente, 7,3 Kg per capita. Esse montante representa um aumento de 21% desses resíduos em cinco anos. Até 2030, a geração mundial de REEE projetada é de 74,7 Mt. Essa tendência de aumento na geração de REEE é reflexo das altas taxas de consumo de equipamentos eletroeletrônicos, com ciclos de vida breves e reduzido potencial de reparo.

O continente asiático é o líder na produção de REEE (24,9 Mt), as Américas ocupam o segundo lugar (13,1 Mt), seguidas da Europa (12 Mt), África (2,9 Mt) e Oceania (0,7 Mt). O Brasil gerou 2.143 toneladas de REEE, em 2019, sendo o quinto país, em geração de REEE, atrás da China, EUA, Índia e Japão.

O relatório indica que 78 países possuem alguma política, regulamentação ou legislação sobre resíduos eletroeletrônicos, o que contempla 71% da população mundial. Esse dado representa um aumento de 5% em relação ao relatório de 2017. Entretanto, em 2019, apenas 17,4% do total de REEE gerado foram devidamente coletados e reciclados. Embora esse dado corresponda a um aumento de 1,8 Mt desde 2014, o aumento de REEE total, no mesmo período, foi de 9,2 Mt, portanto o esforço em aumentar a reciclagem de REEE não está acompanhando o aumento de geração desses resíduos.

A América Latina, México, Costa Rica, Colômbia e Peru lideram a gestão sustentável de lixo eletrônico. O Brasil está estruturando a gestão dos REEE e aprimorando a legislação sobre o tema. Desde 2010, a Lei nº 12.305 estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e determina critérios, para o Sistema de Logística Reversa (SLR), a partir das empresas produtoras. As primeiras cadeias produtivas com diretrizes de SLR regulamentadas e implementadas foram: agrotóxicos, óleos lubrificantes, embalagens, lâmpadas, pilhas e baterias e pneus. Em 2017, o Decreto nº 9.117 estabeleceu a obrigatoriedade de Sistema de Logística Reversa (SLR) por parte dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes (Xavier & Lins, 2018).

Quase 10 anos após a promulgação da PNRS, em 2019, foi celebrado o Acordo Setorial de Eletroeletrônicos, que estabelece os termos da implementação da logística reversa de eletroeletrônicos no Brasil. O SLR de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico foi finalmente regulamentado pelo Decreto Federal nº 10.240/20 que define a fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes metas de instalação de Postos de Entrega Voluntária (PEVs); número de cidades abrangidas e percentual de aparelhos eletroeletrônicos a serem coletados e destinados corretamente.

Apesar do esforço em estabelecer um sistema de logística reversa e uma disposição adequada para o REEE, restam muitos desafios. No Brasil, grande parte dos REE ainda é descartado inadequadamente no lixo comum e tem como destino os aterros sanitários (MMA, 2014; Souza et al., 2016). Outra parte desses resíduos é coletada informalmente por catadores e encaminhada a cooperativas ou a empresas de sucatas. Uma pesquisa realizada por Xavier e colaboradores (2019) também indicou um alto índice de retenção dos equipamentos eletroeletrônicos danificados ou fora de uso, nas residências dos usuários, por desconhecimento ou falta de acesso aos meios adequados de destinação de REEE.

A informalidade na cadeia de reciclagem dos REEE é um risco à saúde humana e ao meio ambiente. REEEs contêm inúmeras substâncias tóxicas e perigosas, como, por exemplo, chumbo, cádmio, mercúrio, retardantes de chama bromados. Anualmente, 50t de mercúrio e 71kt de retardantes de chama bromados são lançados ao meio ambiente por descarte inadequado e cadeias informais de REEE (Forti et al., 2020). A gestão inadequada de REEE também pode liberar gases destruidores da camada de ozônio ou de efeito estufa como clorofluorcarbonos (CFCs) e hidroxiclorofluorcarbonos (HFCs). Um total de 98 Mt de CO₂-equivalentes foram liberados à atmosfera, a partir de refrigeradores e equipamentos de ar-condicionado descartados e processados de modo inadequado; essa emissão corresponde a 0,3% das emissões globais relativas à geração de energia (Forti et al, 2020).

Por outro lado, os resíduos eletroeletrônicos são uma verdadeira “mina urbana”, contendo diversos metais preciosos e críticos, como ouro, prata, paládio (Nithya et al., 2020). Um aparelho de celular pode conter mais de 40 elementos (UNEP, 2013). A reciclagem de REEEs pode recuperar esses metais para uso como matéria-prima secundária. O montante global de REEE gerado, em 2019, contém, aproximadamente, 57 bilhões de dólares em matéria-prima, sobretudo em ferro, cobre e ouro (Forti et al., 2020). O aproveitamento desses materiais, a partir da reciclagem, depende do desenvolvimento de tecnologias eficazes na separação e purificação dos elementos, de modo sustentável e economicamente viável.

A gestão adequada dos REEE também contribui com diversos ODSs da Agenda 2030, como o ODS 3 (saúde e bem-estar); ODS 6 (água potável e saneamento); ODS 8 (emprego digno e crescimento econômico) e ODS 14 (vida debaixo d’água).

Em 2018, foi criado o ISO/TC 323, um comitê internacional com o objetivo de desenvolver estruturas, orientar e apoiar a implementação de projetos de economia circular no mundo. Sob a coordenação da AFNOR (França), a ISO/TC 323 possui 61 membros participantes e 14 membros de fiscalização, sendo o Brasil representado pela ABNT. Como espelho da ISO/TC 323 e, para deliberar sobre o

entendimento brasileiro referente ao tema, a ABNT criou a Comissão de Estudo Especial de Economia Circular (ABNT/CEE-323), com inscrição livre para todos interessados em contribuir com o debate.

Os participantes da ISO/TC 323 foram organizados em quatro grupos de trabalho:

Grupo 1: responsável por definir os princípios, diretrizes e sistemas de gestão e elaborar a norma ISO sobre a EC.

Grupo 2: com a atribuição de estudar a implementação e a aplicação setorial, com base na norma inglesa (BSI 8001:2017 e elaborar documento sobre cadeia de valor e modelos de negócios circulares.

Grupo 3: responsável por definir as ferramentas de suporte, considerando todo o ciclo de vida do produto ou do processo, com o objetivo de publicar um modelo de métrica de circularidade.

Grupo 4: grupo de assuntos específicos, com o objetivo inicial de elaborar relatórios técnicos sobre os temas “abordagem territorial local” e “economia da funcionalidade”.

Alguns tópicos relacionados à ISO / TC 323 são: gestão ambiental, cidades e comunidades sustentáveis, finanças sustentáveis, *blockchain* e tecnologias de registro distribuído e economia compartilhada.

O ISO/TC 323 é mais um exemplo do interesse global na transição para uma economia circular visando a um futuro sustentável para todos.

5.3. Conclusões

Como ponderado, ao longo deste capítulo, o reaquecimento da economia mundial na pós-pandemia é uma oportunidade para grandes avanços rumo à economia circular. As consequências das mudanças climáticas estão cada vez mais tangíveis à população humana, reservas naturais estão se tornando escassas e concentradas, em algumas nações, há um acúmulo de resíduos sólidos no planeta, com contaminação inclusive dos Oceanos. A pandemia aumentou as taxas de desemprego e desigualdades sociais em vários países, portanto urge a transformação do mundo, pautada pela Agenda 2030, que pode ser acelerada pela transição para a EC.

Cabe destacar a importância do consumo acelerado de equipamentos eletroeletrônicos e a tendência de aumento na geração de REEE, sobretudo neste momento de transição para a tecnologia 5G, os REEE. Novos produtos eletroeletrônicos são regularmente lançados e podem ser concebidos, em um modelo circular, desde o *design*, para o aumento da vida útil do produto e uma reciclagem eficiente.

REEEs causam preocupação por seu potencial tóxico e interesse, graças à concentração de diversos metais preciosos e críticos. A mineração urbana, a partir de REEE, é parte importante da circularidade de produtos eletroeletrônicos.

Muitos países já iniciaram a transição, para um modelo econômico mais circular, aproveitando a retomada pós-pandêmica. O Brasil possui arcabouço jurídico e condições socioeconômicas que podem viabilizar ações voltadas à essa transição, no entanto será necessário investir em infraestrutura, tecnologia e aperfeiçoamentos fiscais, para apoiar os agentes responsáveis pelo SLR e pela cadeia de valor reversa. Os capítulos finais deste livro trazem estudos de caso de sucesso com empresas que fazem parte dessa cadeia.

Referências

- BOWEN, A.; KURALBAYEVA, K. Looking for green jobs: the impact of green growth on employment. Policy Brief. Grantham Research Institute on Climate Change, London School of Economics, 2015. http://portal.gms-eoc.org/uploads/resources/3382/attachment/Looking_for_green_jobs_the_impact_of_green_growth_on_employment_GGGI_Grantham_Research_Institute_on_Climate_Change_on_the_Environment_0.pdf
- 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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/decreto/D10240.htm>. Acesso em: 01/08/2020.
- 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. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 01/08/2020.
- Canada's Clean50. Post COVID19: 217 Clean50 Leaders call for a #CleanReset for Canada, 2020. Disponível em: <<https://clean50.com/cleanreset/>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2020.
- CHANGHUA, W. China's Great Green Reset: Carbon neutrality by 2060. CGTN, 2020. Disponível em: <<https://news.cgtn.com/news/2020-09-24/China-s-Great-Green-Reset-Carbon-neutrality-by-2060-U2EvAoswHS/index.html>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2020.
- Circular Economy Policy Research Centre. Employment impact of the transition to a circular economy: literature study, 2018. <https://vlaanderen-circulair.be/src/Frontend/Files/userfiles/files/Employment%20impact%20of%20the%20transition%20to%20a%20circular%20economy%20-%20literature%20study.pdf>
- CONNIE, V. New Quebec-Based Research Team to Restart with a Circular Economy. Environmental Journal, 2020. Disponível em: <https://environmentjournal.ca/new-quebec-based-research-to-restart-with-circular-economy/>. Acesso em: 11 de dezembro de 2020.
- Ellen MacArthur Foundation, Completing the Picture: How the Circular Economy Tackles Climate Change, 2019. www.ellenmacarthurfoundation.org/publications
- Ellen MacArthur Foundation, The circular economy: a transformative Covid-19 recovery strategy: How policymakers can pave the way to a low carbon, prosperous future, 2020. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/The-circular-economy-a-transformative-Covid19-recovery-strategy.pdf>
- ENGSTRÖM, G.; GARS, J.; JAAKKOLA, N.; LINDAHL, T.; SPIRO, D.; BENTHEM, A.A.. What Policies Address Both the Coronavirus Crisis and the Climate Crisis?. Environ Resource Econ 76, 789–810 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10640-020-00451-y>
- Eurocities. EU's Renovation Wave Initiative, 2020. Disponível em: < https://eurocities.eu/wp-content/uploads/2020/09/EUROCITIES-policy-paper-Renovation-Wave_Final_10092020.pdf>. Acesso em: 11 de dezembro de 2020.
- 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.

Material Economics. The Circular Economy and covid-19 Recovery How pursuing a circular future for Europe fits with recovery from the economic crisis, 2020. www.materialeconomics.com

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos. Instrumento de Responsabilidade Socioambiental na Administração Pública Brasília. Secretaria de Articulação Institucional e Cidadania Ambiental. Brasília, 2014.

NITHYA, R.; SIVASANKARI, C.; THIRUNAVUKKARASU, A. Electronic waste generation, regulation and metal recovery: a review. *Environ Chem Lett*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01111-9>

ROMANO, O. Resilient People and Places: Why cities should embrace the circular economy to shape our post-COVID-19 future, OECD, Paris, 2020. <https://www.oecd-forum.org/posts/resilient-people-and-places-why-cities-should-embrace-the-circular-economy-to-shape-our-post-covid-19-future>.

SOUZA, R. G.; CLIMACO, J.C.N.; SANT'ANNA, A.P.; ROCHA, T.B.; VALLE, R.A.B.; QUELHAS, O.L.G. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. *Waste Management*. 2016.

STRAND, J.; TOMAN, M. Green Stimulus, Economic Recovery, and Long-Term Sustainable Development. Policy Research Working Paper; No. 5163. World Bank, Washington, DC, 2010.

UN General Assembly, Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development, 21 October 2015, A/RES/70/1, available at: <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html> [accessed 10 December 2020]

UNEP. Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure. 2013, [online] Available at: <http://www.unep.org/resourcepanel/publications/metalrecycling/tabid/106143/default.aspx>

WEFORUM. The Great Reset, 2020. Disponível em: <https://www.weforum.org/great-reset/>. Acesso em: 11 de dezembro de 2020.

XAVIER, L. H.; LINS, F. A. "Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil", *Brasil Mineral*, No. 379, 2018.

XAVIER, L.H., NASCIMENTO, H.F., OTTONI, M. E-waste management in Brazil. Preliminary results-Brazil/2018 - Questionnaire "5 Questions in 5 Minutes". 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331357472_EWASTE_MANAGEMENT_IN_BRAZIL_Preliminary_resultsBrazil2018_Questionnaire_5_Questions_in_5_Minutes



CAPÍTULO 6

GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: Evolução da legislação brasileira e desafios para uma governança sustentável e circular

Marianna Ottoni

Engenheira Ambiental pela UFRJ
Mestre pelo Programa de Planejamento Energético -
COPPE/UFRJ

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ
Mestre e Doutora pela Engenharia de Produção
COPPE/UFRJ
Pesquisadora Titular no CETEM/MCTI

Luciana Contador

Bióloga pela UFRJ
Mestre em Ciências do Mar (USU)
Doutora em Ciências do Meio Ambiente
Universidade Paris VI
Pós doutoranda PPE COPPE-UFRJ

6.1. Introdução

A Sustentabilidade tem sido amplamente discutida, nas últimas décadas, surgindo em um contexto de crescimento acelerado da produção industrial e na necessidade cada vez mais urgente de se estabelecerem padrões de vida humana que respeitassem os limites naturais do planeta. O termo “Sustentabilidade” está relacionado aos princípios ecológicos de respeitar a autorregeneração da natureza (GEISSDOERFER *et al.*, 2017). Nesse aspecto, a definição de um Desenvolvimento Sustentável (DS), cunhado inicialmente no Relatório Brundtland², viria a “atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades” (WCED, 1987, p. 37). Em outras palavras, consumir recursos de maneira suficiente e responsável para que o planeta consiga se regenerar para prover às próximas gerações.

Anos depois, a sustentabilidade foi trazida para o ambiente das organizações, como uma métrica da performance empresarial, a partir do “Tripé da Sustentabilidade”, conceito envolvendo três principais dimensões: econômico, ambiental e social (ELKINGTON, 1997). Um empreendimento ou atividade em sintonia com os preceitos sustentáveis necessariamente deveria contemplar esses três pilares.

Sustentabilidade e governança possuem uma direta correlação, especialmente, considerando-se o direcionamento proposital do desenvolvimento sustentável aos tomadores de decisão de uma forma mais ampla (VOB *et al.*, 2007; BILLI *et al.*, 2021). A governança pode ser uma forma de alcançar a sustentabilidade, tanto quanto a sustentabilidade pode ser enquadrada como uma forma de alcançar a governança, sendo a governança sustentável não apenas um objetivo meramente científico, mas também normativamente orientado para fins sustentáveis (BILLI *et al.*, 2021). Portanto a governança, para a sustentabilidade, pode ser resumida como um modelo de gestão que garante o equilíbrio adequado dos fatores sociais, ambientais e econômicos, levando em consideração as expectativas da sociedade (SANTOS *et al.*, 2010). Para tal, considera-se a criação de uma estrutura organizacional com uma gerência específica de sustentabilidade, como um elemento fundamental para o alcance dos objetivos anunciados aos *stakeholders* de gestão das esferas ambientais, sociais e econômicas, além de ser uma oportunidade de diferenciação por parte das organizações (SANTOS *et al.*, 2010).

Nesse contexto, em um cenário mais recente de cobranças e avanços na área ambiental, o conceito da Economia Circular (EC) ganha visibilidade, em escala mundial, muito embora os fundamentos desse novo modelo sejam datados de décadas atrás. A EC é definida como uma economia industrial que é restaurativa e regenerativa por intenção e design” (EMF, 2013) e, para tal, são priorizados os fluxos de materiais cíclicos, fontes de energia renováveis e fluxos de energia em cascata (KORHONEN *et al.*, 2018). Uma economia circular bem-sucedida contribui, para todas as três dimensões do desenvolvimento sustentável e limita o fluxo de produção em um nível que a natureza tolera (KORHONEN *et al.*, 2018).

A relação entre abordagens da circularidade e sustentabilidade tem sido discutida na literatura (GEISSDOERFER *et al.*, 2017; MILLAR *et al.*, 2019; SCHOGGL *et al.*, 2020), especialmente no sentido de delimitar as fronteiras conceituais entre ambos os termos. Nesse ponto, são entendidas quatro

² Relatório Brundtland, intitulado *Nosso Futuro Comum (Our Common Future)*, no inglês, foi publicado, em 1987 e discutiu as disparidades entre a pobreza dos países do terceiro mundo e o consumismo elevado dos países do primeiro mundo como os reais impedimentos ao desenvolvimento igualitário das nações, além de gerarem problemas ambientais de escala global.

principais possibilidades (GEISSDOERFER *et al.*, 2017; MILLAR *et al.*, 2019): (i) EC é uma condição para o DS; (ii) EC beneficia o DS; (iii) EC pode gerar custos e benefícios ao DS; (iv) EC é uma ferramenta para o DS. Observa-se, assim, uma falta de consenso, no meio científico, quanto à correlação de ambos os conceitos, especialmente pelo fato de um entendimento mais concreto e amplamente aceito da EC ainda estar em desenvolvimento (KALMYKOVA *et al.*, 2018; REIKE *et al.*, 2018). Para fins deste capítulo, compreende-se que, para alcançar a sustentabilidade em qualquer escala de governança, torna-se fundamental atingir padrões circulares em diversos níveis. Contudo optou-se por tratar de tais conceitos de forma separada, a fim de se destacar a atuação e particularidades de cada abordagem.

Especialmente no caso da gestão de resíduos, a circularidade e a sustentabilidade podem ser entendidas como fatores orientadores de boas práticas, a fim de assegurar a disponibilidade de estoques de recursos naturais às gerações futuras e a aumentar a capacidade de absorção das atividades antrópicas no planeta. As estratégias de recuperação de valor dos resíduos (como o reúso, reciclagem, recuperação energética, entre outros) estão em consonância com uma política de governança circular e sustentável, cabendo destacar, no entanto, a igual importância dos padrões circulares e sustentáveis das demais atividades do ciclo de vida dos produtos, tais quais a extração de recursos, a produção, o uso e o transporte.

Na cadeia dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), a aplicação dos paradigmas circulares e sustentáveis na sua gestão fazem-se ainda mais urgentes, principalmente por causa das particularidades relacionadas com essa tipologia de resíduos (OTTONI *et al.*, 2020). Em decorrência de sua composição, os REEEs podem ser considerados tanto perigosos, com metais tóxicos ao meio ambiente e à saúde humana (KIDEE *et al.*, 2013; ILANKOON *et al.*, 2018), quanto materiais com alto valor agregado passíveis de recuperação, como ouro, prata, cobre, alguns tipos de plástico, entre outros (XAVIER & LINS, 2018). De acordo com Xavier *et al.* (2019), metais preciosos e minerais estratégicos podem corresponder a 80% do valor intrínseco desses equipamentos.

Internacionalmente, um primeiro movimento no sentido de apresentar requisitos, para a gestão sustentável de REEE, foi a proposição da Convenção da Basileia que estabeleceu, a partir do final da década de 1980, restrições à movimentação de resíduos entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, com o objetivo de evitar ou minimizar a exportação de resíduos potencialmente tóxicos para os países em desenvolvimento.

No contexto brasileiro, esses pontos e outras especificidades justificam uma política de gestão especial para tais resíduos, a partir dos mecanismos regulatórios, muito embora ainda sejam numerosos os obstáculos enfrentados no país, em termos de governança sustentável e circular no segmento dos eletroeletrônicos. Sendo assim, os objetivos do presente capítulo consistem na elucidação do progresso da regulamentação brasileira, no âmbito da gestão dos REEE, bem como na discussão dos principais desafios, para a sustentabilidade e circularidade, como abordado, respectivamente, nas Seções 2 e 3 deste estudo.

6.2. Evolução da regulamentação brasileira para REEE

O Projeto de Lei nº 203 de 1991 foi a primeira iniciativa de regulamentação da gestão de resíduos no sentido de proposição de uma Política Nacional. A princípio, o documento versava sobre a gestão de resíduos de medicamentos e apenas, a partir dos anos 2000, trouxe o foco para a gestão de resíduos perigosos. Foi uma discussão que atravessou duas décadas e, além do projeto de lei original,

aproximadamente outros 100 projetos relacionados foram apensados e analisados por comissões especiais. O documento resultou no enriquecimento do debate sobre a gestão de resíduos e no interesse de diferentes atores, como setores industriais e catadores de materiais recicláveis. Em 2008, foi criado um Grupo de Trabalho na Câmara dos Deputados para deliberar sobre a questão e definir o texto que viabilizaria a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 1991).

Conforme histórico da proposição, o referido projeto de lei (BRASIL, 1991) teve origem, a partir do Projeto de Lei do Senado, PLS nº 354 de 1989, que estabelecia inicialmente 11 categorias de resíduos, entre os quais estavam os resíduos domiciliares, de limpeza urbana, de estabelecimentos comerciais e serviços, industriais, de mineração, entre outros. Esse documento inicial ainda definia resíduos perigosos como sendo:

“aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica”;

Tal definição está alinhada com o texto da norma ABNT NBR 10.004:2004, mas foi retirado na versão final do texto da PNRS.

Somente em 2010, os primeiros passos da gestão de REEE, no Brasil, foram concretizados legalmente pela publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pela Lei 12.305/2010, que trouxe princípios, objetivos e instrumentos que delinearão a gestão de resíduos sólidos de forma geral, sendo, logo depois, regulamentada pelo Decreto 7404/2010. Em específico, no caso dos REEEs e outros resíduos especiais, como os pneus, lâmpadas, pilhas e baterias, entre outros, a PNRS destaca a obrigatoriedade da Logística Reversa, definida 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, 2010a).

Assim, a PNRS determinou os Sistemas de Logística Reversa (SLR) como estratégias para impulsionar o retorno de resíduos especiais ao setor produtivo, de forma a garantir sua destinação ambientalmente adequada e a recuperação de elementos e materiais de valor de mercado a partir desses resíduos. O Decreto 7404 apontou como principais formas de estabelecimento dos SLR: (i) Acordos Setoriais (AS), assinados entre o Poder Público e os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes (também chamada de “cadeia direta”); (ii) Regulamentações expedidas pelo Poder Executivo, veiculadas por decreto; (iii) Termos de Compromisso (TC) entre o Poder Público e os agentes da cadeia direta (BRASIL, 2010b). Ainda, a legislação especificou a estruturação e implementação de tais sistemas como uma responsabilidade dos fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes.

Esse entendimento torna-se uma das aplicações de maior destaque do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, como estabelecido no Art. 6º da PNRS. Tal princípio corresponde às ações dos diversos agentes (fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes,

consumidores e titulares dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos), visando à minimização do montante de resíduos e rejeitos gerados, além de seus decorrentes impactos (Brasil, 2010a). Para o efetivo cumprimento da logística reversa no país, cada agente tem sua responsabilidade, como determinado por lei. O Quadro 1 apresenta um resumo das principais responsabilidades de cada ator, na gestão dos REEE, segundo a PNRS (Lei nº 12.305 de 2010 e o Decreto 7.404 de 2010).

Quadro 1. Responsabilidade compartilhada dos agentes na gestão dos resíduos, trazendo o foco para os REEE

Agente	Responsabilidade
Consumidores	<ul style="list-style-type: none"> - Acondicionar adequadamente, de forma diferenciada, os resíduos gerados e suas embalagens; - Disponibilizar adequadamente os resíduos sólidos reutilizáveis e recicláveis para coleta ou devolução nos SLR.
Fabricantes e Importadores	<ul style="list-style-type: none"> - Estruturar e implementar o SLR sob sua responsabilidade; - Providenciar destinação ambientalmente adequada dos resíduos devolvidos e suas embalagens; - Encaminhar rejeitos à disposição final ambientalmente adequada (segundo determinação do órgão ambiental competente ou plano municipal de gestão dos resíduos).
Distribuidores e Comerciantes	<ul style="list-style-type: none"> - Estruturar e implementar o SLR sob sua responsabilidade; - Efetuar a devolução dos produtos e embalagens aos fabricantes ou importadores.
Serviços públicos de limpeza urbana	<ul style="list-style-type: none"> - Pode-se encarregar das responsabilidades dos agentes da cadeia direta mediante remuneração acordada entre as partes.
Cooperativas de catadores de materiais recicláveis	<ul style="list-style-type: none"> - Estabelecer parcerias com agentes da cadeia direta para o processamento de materiais recicláveis

Fonte: Baseado em informações de Brasil (2010b) e Xavier & Correa (2013).

O Quadro 1 apresenta a responsabilidade compartilhada por todos os agentes responsáveis pelos Sistemas de Logística Reversa, conforme estabelecido pela PNRS. Os fabricantes e importadores são os responsáveis por garantir a destinação ambientalmente adequada dos resíduos devolvidos pelos SLR. Distribuidores e comerciantes dividem com fabricantes e importadores a missão de estruturar e estabelecer os SLR. Aos consumidores é atribuída a responsabilidade de destinar seus resíduos para os SLR, por coleta e/ou entrega em PEV. Cabe destacar o papel das cooperativas de materiais recicláveis, que podem atuar na cadeia reversa e processar materiais recicláveis. Contudo, com relação aos REEE,

regulamentações estaduais específicas definem limites para as organizações de catadores, que são habilitadas apenas a pré-processar os REEEs, exigindo-se, para tal, as devidas licenças ambientais e demais documentações oficiais determinadas por cada órgão ambiental competente. Ressalta-se que os REEEs são classificados como resíduos perigosos (ILANKOON *et al.*, 2018) e, por isso, cuidados especiais e mecanismos legais específicos são necessários para evitar acidentes e contaminação.

Outro ponto de destaque na PNRS refere-se à hierarquia dos resíduos, pautada nas opções de priorização na gestão dos resíduos e, dessa forma, diretamente relacionada à cadeia dos REEEs e aos princípios da Economia Circular. Nesse aspecto, a referida Lei enfatiza a seguinte ordem: não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Portanto observa-se que as opções de evitar gerar resíduos (não geração e redução), seguidas daquelas de manutenção do produto, no seu estágio de uso por maior tempo possível (reutilização), como também ressaltado pela Economia Circular, são as prioridades para a gestão de resíduos no Brasil. As alternativas de reciclagem e tratamento são necessariamente de menor preferência e, como último caso, a disposição final dos rejeitos.

Entretanto pelos dados divulgados pela ABRELPE (2019), verifica-se que, no Brasil, a referida hierarquia ainda não é uma realidade no país, considerando-se os valores significativos de disposição de resíduos (passados a rejeitos). Dos resíduos coletados, em 2018, 59,5% foram dispostos nos aterros sanitários, 40,5% foram dispostos inadequadamente em lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2019). Somente no município do Rio de Janeiro estima-se que o percentual de REEE, presente nos resíduos sólidos urbanos (RSU), que são levados a aterros sanitários, tenha saltado de 0,13 % a 0,20% entre os anos de 2008 e 2012 (COMLURB, 2012). Esse fato demonstra a possibilidade de muitas cidades brasileiras ainda destinarem grande parte de seus REEEs, às opções de menor recuperação de valor, gerando desperdício de materiais valiosos, além de possíveis riscos de contaminação ambiental pelas substâncias tóxicas presentes nesses resíduos.

Na sequência da obrigatoriedade apresentada pela PNRS, propostas de sistemas foram enviadas ao Ministério do Meio Ambiente (MMA), em atendimento ao Edital de Chamamento publicado em 2013 (BRASIL, 2013). As propostas apresentadas foram discutidas entre as partes e consolidadas em um documento único. Em 2019, o “Acordo Setorial, para a implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes”, foi assinado.

Conforme redação final do documento, o acordo setorial tem como objeto os REEEs de uso doméstico. Tal definição gerou alguns questionamentos. Duas interpretações sobressaíram aos questionamentos, a saber: (i) os equipamentos em questão não incluiriam, por exemplo, aqueles adquiridos e destinados por pessoa jurídica; (ii) equipamentos de uso geral que, de acordo com a tradução de *household equipment*, a partir da Diretiva WEEE (COMISSÃO EUROPEIA, 2012), seriam aqueles de pequeno e médio porte que atendem necessidades domésticas independentemente de serem adquiridos por pessoa física ou jurídica. Em ambos os casos, excluindo-se os equipamentos de grande porte que demandam altas voltagens, para o seu funcionamento, como turbinas, transformadores e outros.

A gestão de REEE no Brasil conta, ainda, com duas normas técnicas, voltadas para a manufatura reversa de refrigeradores (ABNT NBR 15.833:2018) e de equipamentos eletroeletrônicos, em geral (ABNT NBR 16.156:2013), o que reforça no país as iniciativas e os instrumentos para boas práticas de sustentabilidade e circularidade na gestão desses resíduos a todos os agentes envolvidos. De acordo com Xavier & Lins (2018), ambas as legislações e normas brasileiras, na cadeia reversa dos

eletroeletrônicos, são de caráter pioneiro na América Latina e nos principais países em desenvolvimento.

O edital de chamamento ainda identifica como entidades gestoras a Associação Brasileira de Reciclagem de Eletroeletrônicos e Eletrodomésticos (ABREE) e a Gestora para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos Nacional (Green Eletron) (MMA, 2019). Cabe às gestoras implementar e gerenciar todas as etapas do SLR, considerando a instalação dos Pontos de Entrega Voluntária (PEVs), contratação de operações logísticas com rastreabilidade, destinação à reciclagem propriamente dita dos REEEs coletados, além de ações de comunicação, especialmente com os consumidores, para promover o descarte correto e com as devidas autoridades, a fim de reportar periodicamente suas ações (GREEN ELETRON, 2020). As empresas produtoras e importadoras de eletroeletrônicos no país devem optar por estabelecerem um sistema individual de logística reversa, ou aderirem ao SLR coletivo implementado pelas entidades gestoras.

Entre as metas estabelecidas no acordo, cabiam a instalação de pontos de coleta distribuídos por 400 municípios brasileiros mais populosos, bem como coletar e destinar até o ano de 2025 percentual específico do volume de produtos eletroeletrônicos domésticos comercializados no ano-base de 2018.

No dia 13 de fevereiro de 2020, foi publicado o Decreto Federal nº 10.240/2020, que versa sobre a implementação do SLR, para produtos e componentes eletroeletrônicos pós-consumo de uso doméstico, ou seja, oriundos de pessoa física. Nesse decreto são entendidos, basicamente, dois modelos de SLR, o coletivo (viabilizado por meio da entidade gestora³) e o individual (viabilizada por terceiros sem participação da entidade gestora).

O texto do Decreto replicou o conteúdo firmado no acordo (MMA, 2019), trazendo um caráter de regulamentação a esse documento. Dessa forma, observa-se que, desde a publicação da PNRS até, de fato, a implementação dos SLR de REEE, foram necessários 10 anos de negociação e planejamento. Esse fato pode indicar os desafios enfrentados no país, em termos de conflitos dos interesses envolvidos, a demora na concretização de metas e políticas ambientais, além de todas as dificuldades relacionadas às dimensões territoriais do Brasil e todo o custo envolvido para otimizar estratégias para a gestão sustentável dos REEEs.

Não estão incluídos, segundo o Decreto 10.240/2020, no SLR de REEE, os produtos eletroeletrônicos oriundos de serviço de saúde, pilhas, baterias, lâmpadas, componentes não fixados no equipamento, quantidades oriundas de grandes geradores e equipamentos não domésticos (originários de pessoa jurídica). No entanto, de acordo com o Artigo 7º do referido Decreto, além dos produtos domésticos, as empresas ou entidades gestoras poderão optar por estabelecer SLR de micro e pequenas empresas.

As variações na definição de equipamentos eletroeletrônicos estão refletidas nas principais discussões que seguiram para o estabelecimento dos requisitos para a implementação do SLR para essa categoria de resíduos, conforme detalhado a seguir.

³ Entidade gestora: “pessoa jurídica constituída pelas empresas fabricantes e importadoras ou associações de fabricantes e importadores de produtos eletroeletrônicos, que atenda aos requisitos técnicos de gestão, com o objetivo de estruturar, implementar e operacionalizar o sistema de logística reversa de que trata este Decreto” (Decreto nº 10.2040/2020).

A **Diretiva WEEE (2012/19/EU)** define REEE como resíduos⁴ de equipamentos eletroeletrônicos, incluindo componentes e acessórios que fazem parte do produto no momento do descarte. Esta norma ainda define os equipamentos eletroeletrônicos como: (i) aqueles que dependem de corrente elétrica ou campos eletromagnéticos para seu funcionamento; (ii) equipamentos para geração, transferência e medição de correntes e campos, e (iii) aqueles designados para o uso com voltagem não superior a 1.000 volts para corrente alternada e 1.500 volts para corrente contínua (COMISSÃO EUROPEIA, 2012).

O **Edital de Chamamento nº1 de 2013**, por sua vez, estabelece que o acordo setorial para a implementação do sistema de logística reversa seria estabelecido para resíduos de “produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes cujo adequado funcionamento depende de correntes elétricas de tensão nominal não superior a 220 volts”.

Na norma **ABNT NBR 16.156:2013** resíduos eletroeletrônicos são definidos como “equipamentos eletroeletrônicos, partes e peças que chegaram ao final de sua vida útil ou uso foi descontinuado”, enquanto define equipamentos eletroeletrônicos como “equipamentos, peças e partes 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”.

No documento do **acordo setorial**, publicado em 2019, os REEEs são considerados como resíduos de produtos eletroeletrônicos, ou seja, resíduos de “equipamentos de uso doméstico cujo adequado funcionamento depende de correntes elétricas com tensão nominal não superior a 240 (duzentos e quarenta) volts. Esse documento define ainda:

1. *produtos eletroeletrônicos cinzas ou produtos cinzas*: aqueles produtos e acessórios “importados e/ou comercializados de forma não oficial, não autorizado ou não intencional pelo fabricante original;
2. *produtos eletroeletrônicos órfãos ou produtos órfãos*: aqueles produtos e acessórios “cujo fabricante ou importador deixou de existir no mercado atual.

Essas definições foram replicadas no texto do Decreto nº 10.240 de 2020. Inclusive a definição de que produtos domésticos são aqueles oriundos de pessoa física e os não domésticos de pessoa jurídica.

6.3. Desafios para uma governança sustentável e circular de REEE no Brasil

Apesar de amparada pelos mecanismos legais já estabelecidos na última década, a gestão dos REEEs, no Brasil, ainda enfrenta obstáculos para a concretização de medidas que confirmam maior grau de sustentabilidade e circularidade ao segmento.

Em decorrência das extensas dimensões territoriais do Brasil, os custos com logística, tanto direta quanto reversa, são consideráveis. Nesse aspecto, compreendem-se os gastos com instalações, armazenamento, gestão de estoque, informação e transportes, sendo esse último o custo mais visível (IPEA, 2016). Além desse ponto, cabe destacar, ainda, as emissões de gases do efeito estufa (GEE)

⁴ De acordo com a Diretiva 2008/98/EC, são considerados resíduos “quaisquer substâncias ou objetos de que o detentor se desfaz ou tem intenção ou obrigação de se desfazer” (<https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98>).

relacionados, principalmente, às atividades de transporte. Considerando-se que, no Brasil, grande parte da circulação de mercadorias é feita por modais rodoviários, estima-se que os impactos ambientais (especialmente atmosféricos e energéticos, pelo uso de combustíveis fósseis, em sua maioria) derivados do transporte sejam os mais expressivos (CARVALHO, 2011), afetando diretamente os SLR. Portanto medidas efetivas à sustentabilidade e circularidade nesse aspecto devem ser pautadas em planejamento, identificação de melhores rotas e preferência por combustíveis alternativos. Especialmente no caso dos REEE, sugerem-se estudos, para a avaliação de pontos de consolidação de carga (REEE em trânsito), otimizados entre os locais de geração (em geral, zonas urbanas) e as unidades de processamento desses materiais, ao longo do país, de forma a garantir volumes mínimos e menor número de viagens entre tais pontos.

No atual cenário brasileiro, observam-se, ainda, lacunas de informação relacionadas, principalmente, à geração de REEE e seus fluxos no país (SOUZA *et al.*, 2016; OTTONI *et al.*, 2020). Esse fato pode ser atribuído à falta de bancos de dados oficiais específicos, para essa tipologia de resíduos, em nível nacional, mesmo após 10 anos da promulgação da PNRS, que versa sobre o direito da sociedade à informação e ao controle social (BRASIL, 2010a). A divulgação insuficiente ou ineficaz da informação acaba por conduzir a inadequações em planejamentos, ações, serviços, regulação e controle social (MEIRELES, 2015), especialmente no tocante à gestão de resíduos.

Correlacionado a esse ponto, o alto grau de informalidade no setor pode ser constatado pela literatura (SOUZA *et al.*, 2016; OTTONI *et al.*, 2020). Atividades ilegais e informais também são responsáveis por uma grande quantidade de equipamentos eletroeletrônicos consumidos no país (SOUZA *et al.*, 2016), e estudos apontaram para o frequente uso de rotas informais/ilegais de reciclagem desses materiais no país (OLIVEIRA *et al.*, 2012; SOUZA *et al.*, 2016; CAIADO *et al.*, 2017; SOUZA, 2020). Dessa forma, observa-se que o Brasil ainda enfrenta dificuldades relacionadas à rastreabilidade dos REEEs gerados, seja pela representatividade das cadeias informais no país ou mesmo por causa da falta de cobranças legais mais firmes aos agentes da cadeia reversa, impactando diretamente na declaração de informações, para contribuir com o controle de fluxos da LR dos REEE e, por consequência, comprometendo a circularidade e sustentabilidade no segmento.

Ainda, a falta de unidades no Brasil, para processamento da fração mais valiosa dos REEE, os metais preciosos, leva à exportação desses resíduos para plantas especializadas em outros países (SOUZA, 2020), especialmente na Europa. Grande parte dos metais preciosos estão presentes nas placas de circuito impresso, componentes existentes em praticamente todos os produtos eletroeletrônicos (MARQUES *et al.*, 2013). A exportação desses resíduos resulta não somente na perda de valor para o país, mas, da mesma forma, em potenciais aumentos dos níveis de emissão de gases do efeito estufa, em razão do transporte desses materiais, para tais usinas fora do país, a longas distâncias dos pontos de geração. Cabe destacar a necessidade de estudos, a fim de avaliar o potencial de implantação de unidades à recuperação desses elementos, a partir dos REEEs no Brasil, como uma possível estratégia, para aumento dos níveis de mineração urbana, redução da pegada de carbono, e, com isso, aumentos dos níveis de circularidade e sustentabilidade no país. Ressalta-se, contudo que os esforços voltados para opções de redução da geração de REEE e seu reúso devem ser priorizadas quanto às alternativas de reciclagem dentro dessa perspectiva do DS e EC.

Outra particularidade seria referente ao alto grau de retenção de produtos eletrônicos em desuso, seja por defeitos ou novos modelos no mercado pelos consumidores em suas residências. De acordo com o estudo de Ottoni & Xavier (2019), pautado em um questionário, em nível nacional para os cidadãos

brasileiros, 85% dos respondentes afirmaram ter equipamentos eletroeletrônicos obsoletos em suas residências. Esse fato indica a possibilidade de uma grande parcela dos REEEs, gerados no país, estarem estocados com os consumidores, em vez de seguirem para as rotas de valorização por meio da LR, podendo prejudicar a cadeia reversa, que, por sua vez necessita de quantidades mínimas de REEE para justificar os gastos com processamento e ter ganhos de escala.

Configura-se, ainda, como um desafio à implementação de padrões circulares e sustentáveis no segmento a problemática da indefinição dos incentivos econômicos e, especialmente, a tributação dos REEEs. No atual cenário, as organizações atuantes, na cadeia reversa desses resíduos, pagam tributos equivalente às indústrias de transformação, o que pode ser entendido como uma desvantagem, em termos de aumentos dos custos de processos desses agentes e consequente desestímulo à mineração urbana. Dessa forma, ressalta-se a necessidade de que incentivos às rotas secundárias (via recondiçãoamento, remanufatura e reciclagem), a partir de uma regulamentação fiscal específica (atualmente inexistente), para impulsionar as medidas de aproveitamento de valor, a partir dos resíduos e assegurar aumento de competitividade dos materiais reciclados e/ou recicláveis quanto às matérias-primas virgens (CANELOI, 2011).

Por fim, as limitações do atual contexto brasileiro são desafiadoras, especialmente para a implementação otimizada dos SLR de REEE nos próximos anos. Contudo o entendimento dos principais obstáculos pode ser um ponto de partida, para o planejamento estratégico e eficiente desses sistemas e consequente conquista de níveis adequados de circularidade e sustentabilidade no segmento.

6.4. Conclusões

O presente capítulo versou sobre as relações entre os conceitos do desenvolvimento sustentável e da economia circular, no tocante aos sistemas de gestão e governança, com especial foco para o segmento dos REEEs no Brasil. Os principais mecanismos legais e normativos específicos para os REEEs foram discutidos à luz dos 10 anos de publicação da PNRS e os principais desafios enfrentados no país para o estabelecimento de um modelo circular e sustentável no âmbito da cadeia reversa dos eletroeletrônicos.

Como principais ressalvas, destaca-se que, para garantir a sustentabilidade (nos três pilares ambiental, econômico e social), necessariamente padrões circulares devem ser implementados, de forma a garantir estoques de recursos naturais (aumento de capital natural) e aumentar a capacidade de absorção dos impactos derivados dos processos nessa cadeia. A identificação e compreensão dos desafios centrais possibilita a criação de oportunidades de melhorias em longo prazo.

Finalmente, sugere-se que futuros estudos nesse contexto possam abordar métricas, para avaliar o grau de sustentabilidade, a partir de premissas da EC, do segmento de eletroeletrônicos no Brasil e levantar sugestões mais detalhadas para os principais problemas identificados.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE, 2019. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. São Paulo, 68 p.

BRASIL, 1991. Projeto de Lei nº 203 de 1991. Dispõe sobre o acondicionamento, a coleta, o tratamento, o transporte e a destinação final dos resíduos de serviços de saúde. Disponível em: <https://www.camara.leg.br/proposicoesWeb/fichadetramitacao?idProposicao=15158>. Acesso em março de 2021.

BRASIL, 2010a. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 06. Dez. 2020.

BRASIL, 2010b. Decreto Nº 7.404, 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 06. Dez. 2020.

BRASIL, 2013. Edital de Chamamento para a Elaboração de Acordo Setorial para a Implantação Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes. Edital nº 01/2013. Disponível em: http://www.mma.gov.br/images/editais_e_chamadas/SRHU/fevereiro_2013/edital_ree_srhu_18122012.pdf. Acesso em: 06. Dez. 2020.

CAIADO, N., GUARNIERI, P., XAVIER, L.H., CHAVES, G.L.D., 2017. A characterization of 359 the Brazilian market of reverse logistic credits (RLC) and an analogy with the existing carbon credit market. Resources, Conservation and Recycling 118, 47–59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.11.021>

CANELOI, T.P., 2011. Reciclagem e políticas públicas: a questão da tributação dos materiais recicláveis e reciclados. Dissertação em Direito Político e Econômico, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 139 p.

CARVALHO, C.H.R., 2011. Emissões relativas de poluentes do transporte urbano. Em: Boletim regional, urbano e ambiental – IPEA, 123-139.

COMISSÃO EUROPEIA, 2012. Diretiva 2012/19/EU. Diretiva do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012 relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE) (reformulação). Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02012L0019-20180704&from=EN> Acesso em março de 2021.

COMPANHIA MUNICIPAL DE LIMPEZA URBANA – COMLURB, 2012. Caracterização gravimétrica e microbiológica dos resíduos sólidos do município do Rio de Janeiro, Centro de Informações Técnicas da COMLURB: Rio de Janeiro, RJ.

ELKINGTON, J., 1997. Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of Twenty-First-Century Business. Capstone, Mankato.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION – EMF, 2013. Towards the Circular Economy. Vol 1. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Elle-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>. Acesso em: 06. Dez. 2020.

GEISSDOERFER, M., SAVAGET, P., BOCKEN, N.M.P., HULTINK, E.J., 2017. The circular economy – a new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production* 143, 757–768. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>.

GREEN ELETRON, 2020. Esclarecemos as quatro principais dúvidas das empresas sobre a gestão de resíduos eletroeletrônicos. 26 de março de 2020. Disponível em: <https://www.greeneletron.org.br/blog/esclarecemos-as-quatro-principais-duvidas-das-empresas-sobre-a-gestao-de-residuos-eletronicos/>. Acesso em: 04. Fev. 2021.

ILANKOON, I.M.S.K., GHORBANI, Y., CHONG, M.N., HERATH, G., MOYO, T., PETERSEN, J., 2018. E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery. *Waste Management* 82, 258–275. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.018>

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA – IPEA, 2016. Logística e transportes no Brasil: Uma análise do programa de investimentos 2013-2017 em rodovias e ferrovias. Relatório de Pesquisa. Rio de Janeiro, 30p. Disponível em: http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7420/1/RP_Log%C3%ADstica_2016.pdf. Acesso em: 09. Dez. 2020.

KIDEE, P., NAIDU R., WONG M.H., 2013. Electronic waste management approaches: an overview. *Waste Management* 33, 1237-1250. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.006>

KORHONEN, J., HONKASALO, A., SEPPÄLÄ, J., 2018. Circular Economy: The Concept and its Limitations. *Ecological Economics* 143, 37–46. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.06.041>

MARQUES, A.C., CABRERA, J., MALFATTI, C.F., 2013. Printed circuit boards: A review on the perspective of sustainability. *Journal of Environmental Management* 131, 298-306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.10.003>

MEIRELES, S., 2015. Sistema municipal de informações sobre resíduos sólidos como instrumento de gestão e gerenciamento. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis. Disponível em: https://residuos.paginas.ufsc.br/files/2016/04/DISSERTACAO_SARA-MEIRELES_A5_final3-1.pdf. Acesso em: 08. Dez. 2020.

MILLAR, N., MCLAUGHLIN, E., BÖRGER, T., 2019. The circular economy: swings and roundabouts? *Ecological Economics* 158, 11–19. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.12.012>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2019. Eletroeletrônicos e seus componentes. 19 de Novembro de 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/component/content/article/2-sem-categoria/474-acordo-setorial-de-eletronicos>. Acesso em: 06. Dez. 2020.

OLIVEIRA, C.R., BERNARDES, A.M., GERBASE, A.E., 2012. Collection and recycling of electronic scrap: a worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. *Waste Management* 32, 1592-1610. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.04.003>.

OTTONI, M., XAVIER, L.H., 2019. Circularity in the management of waste electrical and electronic equipment (e-waste): Contributions to urban mining in Brazil. XXVII Jornada de Iniciação Científica e III Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM). Disponível em: https://www.cetem.gov.br/jornadas/jornada-de-iniciacao-cientifica/item/download/2754_8bbc32c084c1d3c26ae882b0c195e8bc. Acesso em: 06. Dez. 2020.

OTTONI, M., DIAS, P., XAVIER, L.H., 2020. A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production* 261, 120990. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120990>

SANTOS, S., BARBOSA, P., GAI, E., 2010. Sustainability Governance Portuguese Companies in an International Context. *Sustentare*. Disponível em: [http://www.sustentare.pt/pdf/doc.suste+sam\(ENG1\).pdf](http://www.sustentare.pt/pdf/doc.suste+sam(ENG1).pdf). Acesso em: 06. Dez. 2020.

SCHOGGL, J., STUMPF, L., BAUMGARTNER, R.J., 2020. The narrative of sustainability and circular economy - A longitudinal review of two decades of research. *Resources, Conservation & Recycling* 163, 105073. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105073>

SOUZA, R.G., CLÍMACO, J.C.N., SANT'ANNA, A.P., ROCHA, T.B., DO VALLE, R., DE, A.B., QUELHAS, O.L.G., 2016. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. *Waste Management* 57, 46-56. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.01.034>.

SOUZA, R.G., 2020. E-waste situation and current practices in Brazil. In: *Handbook of Electronic Waste Management*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817030-4.00009-7>

VOß, J.P., NEWIG, J., KASTENS, B., MONSTADT, J., N€OLTING, B., 2007. Steering for sustainable development. A typology of problems and strategies with respect to ambivalence, uncertainty and distributed power. *J. Environ. Pol. Plann.* 9, 193-212.

WORLD COMMISSION ON ENVIRONMENT AND DEVELOPMENT – WCED, 1987. *Our Common Future*. Disponível em: https://www.are.admin.ch/are/en/home/sustainable-development/international-cooperation/2030agenda/un-_-milestones-in-sustainable-development/1987-brundtland-report.html. Acesso em: 5. Dez. 2020

XAVIER, L.H., LINS, F.A.F., 2018. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. *Brasil Mineral* 379, 22-26.

XAVIER, L.H., GIESE, E.C., RIBEIRO-DUTHIE, A.C., LINS, F.A.F., 2019. Sustainability and the circular economy: A theoretical approach focused on e-waste urban mining. *Resources Policy*, 101467. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101467>

PARTE II
ANÁLISE DO POTENCIAL DOS
RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS





CAPÍTULO 7

A IMPLEMENTAÇÃO DOS SISTEMAS DE LOGÍSTICA REVERSA DE REEE NO BRASIL

Jéssica dos Santos Cugula

Graduanda em Engenharia Ambiental pela UFRJ

Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Raíssa André de Araujo

Engenheira Ambiental pela UFRJ

Mestranda em Engenharia Ambiental pelo PEA/UFRJ

Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

7.1. Introdução

Os acordos e regulamentações abordados neste texto levam em conta a definição de eletroeletrônicos apresentada por Xavier et al. (2018), em que são englobados eletrônicos em geral, pilhas e baterias e lâmpadas, sendo esses os casos de estudo. Em razão de suas particularidades, cada qual possui seus instrumentos próprios para a implantação e operacionalização de seus Sistemas de Logística Reversa (SLR), cujos marcos principais serão apresentados e brevemente discutidos.

Os acordos setoriais instituídos pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei n^o 12.305 e Decreto n^o 7.404 de 2010), assim como os termos de compromisso ou regulamentação específica, têm por objetivo criar condições para a viabilização do Sistema de Logística Reversa das tipologias de resíduos consideradas obrigatórias. Tanto os acordos setoriais quanto os termos de compromisso são contratos entre o poder público e aqueles envolvidos no ciclo de vida dos produtos (fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes). Difere entre os dois é que o primeiro é adotado, no âmbito federal, enquanto o segundo é uma medida localizada (estados, regiões e cidades) que pode ser implementada quando não há a vigência de um acordo ou complementarmente. Anteriormente à assinatura de um acordo setorial, os estados podem firmar termos de compromisso adiantando-se à implementação do SLR. A regulamentação tem caráter obrigatório e restritivo, conforme instrumentos de comando e controle. Com o papel de ampliar a atuação do acordo setorial, os termos de compromisso podem ser empregados pelos governos estaduais de forma conjunta, a fim de que mais municípios podem ser contemplados pelo SLR.

Na ausência do estabelecimento de termo de compromisso ou acordo setorial, são estabelecidas regulamentações específicas. No caso específico da logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos pós-consumo, foram estabelecidos tanto termos de compromisso, no âmbito de alguns estados, quanto o acordo setorial assinado em 2019 e, por fim, o Decreto n^o 10.240 de 2020 que estabelece as diretrizes para o segmento, em concordância com o documento do acordo setorial, reforçando a obrigatoriedade de implantação por parte de todos os agentes da cadeia. Cabe ressaltar que, em razão de ordenamento jurídico, o referido decreto se sobrepõe ao acordo setorial firmado em 2019.

Descritos com maior detalhamento no Decreto n^o 7.404 de 2010, que regulamentou a PNRS, os procedimentos e requisitos necessários foram ali abordados e seguidos no desenvolvimento das tomadas de decisões referentes aos SLR. No contexto da responsabilidade compartilhada, para evitar que as organizações não signatárias dos acordos setoriais preferirem manter essa posição, a fim de garantir uma segurança, no que diz respeito ao cumprimento dos termos estabelecidos em tais documentos, foi regulamentado o Decreto n^o 9.177 de 2017. O decreto assegura a isonomia na fiscalização e no cumprimento das obrigações, estabelecendo que os signatários e não signatários imputam os mesmos compromissos no SLR.

Priorizando os conceitos da economia circular, tais ações auxiliam o direcionamento do produto pós-consumo a outras formas de aproveitamento, inclusive como insumos para o setor produtivo. Uma questão importante diz respeito ao planejamento ou design dos equipamentos, cujo propósito é atender a funcionalidade ou padrão estético, sem considerar possibilidades de reparo ou desmontagem. Por muito tempo fabricantes e envolvidos na cadeia produtiva não foram responsabilizados pelos impactos socioambientais da geração de resíduos a partir do pós-consumo. Desta forma, os instrumentos previstos na PNRS tornam obrigatória a coleta, retorno e processamento de materiais e produtos pós-consumo, promovendo a circularidade e a sustentabilidade.

Mesmo com a obrigatoriedade e financiamento pelos atores da responsabilidade compartilhada, prestadores de serviços (formais ou informais) são fundamentais nas atividades logísticas, pois atuam

localmente, atendendo a demanda da população. Tendo em vista que os custos logísticos de coleta e transporte representam uma das principais dificuldades da cadeia de logística reversa, pois os resíduos são gerados de forma pulverizada, necessita-se de um sistema complexo de coleta e consolidação de carga. Em um país de dimensões continentais como o Brasil, a eficiência dos modais de transporte tem comprometido o deslocamento de cargas e tornando o processo mais oneroso.

A atuação dos catadores, na gestão dos materiais recicláveis, apesar de ser apoiada e incentivada pela PNRS, deve respeitar exigências estaduais, como é o caso da exigência de licenciamento ou documentação equivalente, para a operação em alguns estados brasileiros.

Para o gerenciamento de REEE, deve-se observar, por exemplo, o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) e evitar contato direto com possíveis contaminantes. A atuação de catadores, por meio de associações e cooperativas, é essencial para o funcionamento do SLR.

Os acordos e regulamentações são essenciais, para a definição das responsabilidades e atribuições de cada um dos atores envolvidos, sejam elas financeiras ou operacionais. Com isso, é possível a cobrança das atuações e cumprimento das metas, assim como os cronogramas previstos. Para tal, devem ser criados meios para a integração, resolvendo os múltiplos desafios da complexidade da gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, de forma a tornar o sistema eficiente e viável.

7.2. Lâmpadas

As lâmpadas representam uma categoria de equipamentos essenciais e bastante difundidos, em todos os segmentos, em que sua evolução buscou cada vez mais a eficiência de geração, o que acabou resultando na utilização de substâncias tóxicas, como foi o caso do mercúrio, em lâmpadas fluorescentes, apresentada pela convenção de Minamata (BRASIL, 2018) da qual o Brasil é signatário. Ressalta-se que, de acordo com a norma ABNT NBR 10.004:2004, classificam-se as lâmpadas pós-consumo como perigosas, pois é durante o desmonte que pode ocorrer a liberação de substâncias que causarão impactos negativos para a saúde do trabalhador e ao meio ambiente. Por outro lado, há materiais valiosos em sua composição que podem ser recuperados.

Em junho de 2012, foi lançado o edital de chamamento público, para o acordo setorial de lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista, o qual foi assinado em novembro de 2014 pelas partes representantes, entre as quais estão: o Ministério do Meio Ambiente (MMA), as Associações Brasileiras da Indústria e da Iluminação (ABILUX) e de Fabricantes e Importadores de Produtos de Iluminação (ABILUMI) e as empresas importadoras e distribuidoras. O documento foi publicado no Diário Oficial da União em março de 2015. As ações foram convertidas no programa Reciclus, sob responsabilidade da gestora de logística reversa, a Associação Brasileira para Gestão da Logística Reversa de Produtos de Iluminação (RECICLUS).

A Reciclus tem atuado desde 2015, porém, após ações de organização interna e testes do Sistema de Logística Reversa a ser implantado, as ações se efetivaram a partir de 2016. Ao analisar o número de municípios abrangidos pelo programa, em comparação com o teor do acordo setorial, é perceptível o não cumprimento das metas estabelecidas, e a empresa gestora identifica a resistência do comércio como principal entrave para o sucesso do programa. Como mostrado em seu Relatório de Atividades, para o ano de 2019, participavam do sistema 419 municípios, atendidos por 1.930 pontos de coleta, cumprindo a lista dos municípios previstos no acordo setorial (Reciclus, 2019). O modelo implementado de coleta que ocorre, por meio de pontos de coleta voluntários (PEVs), deve considerar

a distribuição espacial da população, para que tenha uma real eficiência, bem como seguir um plano de comunicação e de educação ambiental.

Na ausência de acordo setorial, editais de chamamento, para termos de compromissos com abrangências estaduais, foram elaborados, como foi o caso Espírito Santo. O estado do Espírito Santo, em novembro de 2014, publicou em diário oficial seu edital para todos os resíduos previstos na PNRS (SEAMA, 2014). Já no ano seguinte ao acordo setorial, o estado de Minas Gerais lançou seu edital, aprovado em 2016, entrando em vigência de 2017 a 2021 (FEAM, 2020). Em 2020, o Ministério Público do Paraná, com a participação do governo estadual, firmou um termo de compromisso com a Reciclus para a implementação do sistema em todos os municípios do estado (MPPR, 2020).

Enfatizando tanto a PNRS quanto o acordo setorial, a Resolução nº 01 de 2016 do Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO) estabelece a obrigatoriedade da participação de fabricantes e importadores de lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista e seus componentes do SLR. Transmitida a confirmação de participação pelo Ministério do Meio Ambiente, ocorre a anuência para a importação e comercialização dos produtos.

7.3. Eletroeletrônicos

Os equipamentos eletroeletrônicos representam uma categoria de resíduos complexos, pois apresentam em sua composição tanto materiais valiosos como também são compostos por metais pesados e poluentes químicos tóxicos (Bakhiyi et al., 2017). Dessa forma, a reinserção dos resíduos e seus componentes no ciclo produtivo se configura como um aproveitamento econômico, mas também como uma maneira de impedir a contaminação pelo descarte irregular.

O processo de implementação do SLR reversa de eletrônicos foi a mais demorada, em comparação com os segmentos de lâmpadas e o de pilhas e baterias. Em 2012, foi realizado e publicado pela Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) o estudo sobre a viabilidade técnica, para a implantação do sistema de logística reversa ao segmento de eletroeletrônicos (ABDI, 2013), o que proporcionou o conhecimento dos principais desafios que seriam enfrentados. O MMA lançou o edital de chamamento, para a apresentação de propostas de acordos setoriais, em 2013, definindo a obrigatoriedade da apresentação de algumas definições, tais como: formas de coleta, os responsáveis pelas atividades no ciclo, inclusão de outras organizações (cooperativas, entre outras) e constante atualização de metas (MMA, 2013). Somente no ano seguinte foram unidas e formaram uma proposta unificada. Por causa das discordâncias entre as gestoras do setor, em relação aos requisitos de propriedade do bem, periculosidade, tributação, licenciamento, transporte e responsabilidades, a versão final consolidada do documento foi apresentada ao MMA apenas em 2018. Após um período de discussão, o acordo foi assinado, em 2019 pelo MMA, ABINEE, Associação Brasileira da Distribuição de Produtos e Serviços de Tecnologia da Informação (ABRADISTI), Federação das Associações das Empresas Brasileiras de Tecnologia da Informação (ASSESPRO Nacional), Green Eletron. No entanto todos os agentes da cadeia de logística reversa deveriam cumprir as exigências previstas conforme isonomia estabelecida pelo Decreto nº 9.177 de 2017. Desta forma, entende-se que o Decreto nº 10.240 de 2020 endossou a isonomia e ainda reafirmou os quesitos constantes no documento do acordo setorial.

Antes do acordo setorial, alguns estados já haviam tomado iniciativas, quanto à operação de sistemas de coleta desses resíduos, tais como o estado de São Paulo. Em 2012, foi firmado o termo de compromisso de aparelhos celulares entre quatro operadoras de telefonia móvel, vigorando até 2016. Em 2017, foi estabelecido o termo de compromisso para Eletrodomésticos de Uso Doméstico, tendo

como participantes a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA), ABINEE, Federação do Comércio de Bens e Serviços e Turismo do Estado de São Paulo (FECOMERCIO-SP) e Green Eletron (CETESB, 2017). Além de eletroeletrônicos, há regulamentações anteriores até mesmo à PNRS, como a Lei do lixo tecnológico do estado de São Paulo - Lei nº 13.576, de 6 de julho de 2009. No entanto, por não ser uma iniciativa nacional, as taxas de coleta são baixas e heterogêneas ao longo do país.

Após a conclusão do documento do acordo setorial, a regulamentação do sistema de logística reversa foi estabelecida em definitivo, por meio do Decreto Federal nº 10.240, publicado em fevereiro de 2020. Em caráter obrigatório, o seu não cumprimento implica sanções amparadas, segundo a redação da PNRS protegida pela Lei de Crimes Ambientais (Lei nº 9.605 de 1998). A partir desse decreto, foram definidas metas, para a implementação e operacionalização do sistema de logística reversa, bem como o financiamento, entre outros requisitos. Ficou definido que a aplicação se daria em duas fases.

- Fase 1: início imediato após o decreto (fevereiro de 2020) e prazo até o dia 31 de dezembro de 2020, sua implementação **baseada na adesão dos agentes do ciclo de vida do eletroeletrônico** ao que estava apresentado no documento, além do desenvolvimento de mecanismos de coleta de dados e regulamentações especializadas no gerenciamento;
- Fase 2: iniciada em janeiro de 2021 e com a duração estabelecida em cinco anos com metas bem definidas de coleta de resíduos eletroeletrônicos, isto é, a cada ano, uma certa porcentagem de resíduos precisa ser coletada, resultando em, no mínimo, 400 municípios atendidos em sua totalidade e 17% dos resíduos **coletados e destinados** até 2025, conforme estabelecido no Decreto nº 10.240 de 2020.

Com relação a outras definições do decreto, a operação deve seguir a ordem de: descarte do resíduo, recebimento e armazenamento, transporte para pontos de consolidação e destinação final ambientalmente adequada (BRASIL, 2020). O financiamento do sistema se dará pelas empresas, que podem repassar parcela para o consumidor. As entidades gestoras são a Associação Brasileira da Indústria elétrica e eletrônica (ABINEE) e a Green Eletron, cabendo a elas apresentar os resultados da logística reversa, supervisionar as fases de estruturação, implementação e operação do sistema e apresentar relatórios para acompanhamento (BRASIL, 2020). No funcionamento do sistema, inclui-se também a instalação de pontos de recebimentos, seguindo prioridades espaciais definidas no Art. 48 do Decreto nº 10.240 de 2020. Atualmente estão alocados mais de 258 coletores espalhados pelos estados brasileiros que podem ser acessados nos sites das gestoras.

Uma questão importante para os resultados do acordo setorial são as organizações do segmento de resíduos eletroeletrônicos, que são poucas e concentradas na região Sudeste. Os custos de transporte dos eletroeletrônicos só serão viáveis, em todo o território nacional, caso haja umas organizações especializadas espacialmente distribuídas eficientemente, pois seriam caríssimos os gastos da movimentação de tais equipamentos até a região Sudeste. A identificação de tais organizações tem uma urgência pelo ano de 2021 iniciar a 2ª, fase do acordo, havendo a habilitação de prestadores de serviços. Um histórico do quantitativo de organizações identificadas é apresentado na Figura 1.



Figura 1. Prospecção de organizações do segmento de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

Para que possam ser habilitadas às organizações, devem cumprir os requisitos decididos pela gestora. Entre eles estão a norma ABNT NBR 14.001:2015 e a certificação R2 (Green Eletron, 2020), que possuem um alto custo para organizações de pequeno porte e principalmente cooperativas. As cooperativas são incentivadas a participar do sistema pela vulnerabilidade de seus cooperados, com um relevante papel social e na coleta de resíduos. Considera-se que ou haverá a modificação de tais critérios ou auxílio às condições atuais das cooperativas, para que alcancem o nível esperado, caso não, estarão excluídas do SLR.

A existência do acordo setorial não impede de organizações criarem ou continuarem programas próprios de logística reversa, porém devem ser com contratação ou de acordo prévio com as empresas ou entidades gestoras, se não, serão consideradas voluntárias e não ao SLR nacional. Como exemplos estão os casos da Samsung com pilhas, baterias e celulares, Motorola com celulares, baterias e acessórios e a HP com impressoras e cartuchos (Motorola, 2021) (Samsung, 2021).

Vale ressaltar que a parcela da sociedade à qual tais regulamentações se aplicam é ao resíduo gerado pelo usuário final/individual. As organizações jurídicas e grandes geradores são encarregados de destinar adequadamente seus resíduos, de acordo com a licença e requisitos legais de funcionamento, sendo comprovados por documentos, como manifestos e termos de destinação, com penalização do descumprimento de suas obrigações. Com isso, grande parte dos eletrônicos de grande porte não estão inclusos no SLR, entre eles, os advindos de organizações da área da saúde.

7.4. Pilhas e baterias

Pilhas são produtores eletroquímicos que geram corrente elétrica por conversão, sendo essa função realizada pelo agrupamento de dois eletrodos e um eletrólito; já a bateria é um agrupamento de pilhas, seja em série ou paralelo (Bocchi et al., 2000). Sua composição está constituída de metais pesados, como mercúrio, chumbo e níquel que podem causar grandes problemas ambientais caso descartados de forma incorreta (Mantuano et al., 2011). Em oposição às duas tipologias já mencionadas no texto, o acordo setorial não foi o instrumento escolhido para a logística reversa de pilhas e baterias e, sim, a regulamentação.

A primeira legislação brasileira e da América Latina referente a pilhas e baterias, em nível federal, foi a Resolução CONAMA nº 257 de 30/06/1999 (Mantuano et al., 2011), que estabelece que pilhas e baterias que contenham em suas composições chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos devem ser entregues pelos usuários a estabelecimentos comerciais responsáveis pela sua venda e assistências técnicas, para que retornem aos fabricantes e importadores para a reutilização, reciclagem, tratamento ou disposição final ambientalmente adequada. No caso de acumuladores de grande porte, utilizados em atividades industriais, deveriam retornar direto aos importadores e fabricantes. Deste modo, já eram previstas as ações atribuídas à logística reversa, porém sem a utilização do termo e as

responsabilidades e mecanismos de financiamento de cada ator. Ficou definido, então, que os importadores e fabricantes teriam o prazo de 12 meses, para implementar o sistema de coleta, transporte e armazenamento e prazo de 24 meses para os sistemas de destinação final. Além disso, era necessário identificar as embalagens, quanto à redução das substâncias perigosas, o que definiria se elas iriam para os aterros sanitários domésticos ou passariam por outros processos para reduzir sua periculosidade.

A legislação vigente e que revogou a CONAMA nº 257, quanto à produção e descartes de pilhas e baterias, é a CONAMA 401/2008. Apresenta os mesmos tópicos principais, porém a mais recente tenta resolver algumas lacunas deixadas pela CONAMA 257/99, principalmente na responsabilidade dos atores da logística reversa e da inserção de informações acerca da educação ambiental nesse setor. Ambas possuem o foco da não contaminação, durante a disposição inadequada, solucionada por meio da destinação ambientalmente correta, porém não focam a valorização do resíduo para a obtenção de matéria-prima, renda e oportunidades sociais (Ferreira & Chaves, 2011) (Guarnieri, 2011). No tocante aos teores máximos de metais, são mais restritos em relação à resolução anterior, possuindo o mesmo prazo de um ano para seu atendimento. No entanto, mesmo com o seu cumprimento, para as baterias de chumbo-ácido, níquel cádmio e óxido de mercúrio, não são permitidas a incineração e a disposição em aterros sanitários de quaisquer espécies. Mesmo com os melhoramentos, não foram claras as responsabilidades financeiras dos custos do SLR.

Em novembro de 2010, as fabricantes e importadoras representadas pela Abinee se uniram no Programa Abinee Recebe Pilhas, com o objetivo tanto de seguir a CONAMA 401/2008, quanto a recém implementada PNRS. Nele são previstos que os consumidores domésticos podem descartar seus resíduos em pontos de coleta, instituições públicas, e iniciativas podem receber o serviço de coleta e destinação de forma gratuita com o cumprimento de três requisitos e, por fim, a iniciativa privada no ponto de coleta (máximo de 10kg) ou arcando com os custos logísticos até a recicladora no estado de São Paulo. Nos três casos, as associadas são responsáveis pelo aporte financeiro da destinação final. O Projeto foi gerenciado pela Abinee até março de 2018, quando a gestora Green Eletron assumiu o sistema de logística reversa (Abinee, 2018).

Em 2012, foi publicada a Instrução Normativa Ibama nº 8, que institui que fabricantes e importadores cumpram os procedimentos previstos na normativa no que diz respeito ao controle do recebimento e destinação final de pilhas e baterias. Os fabricantes e importadores têm a obrigação de declarar o Relatório Anual de Atividades, do Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais - CTF, em que deve estar presente o laudo físico-químico de composição e o Plano de Gerenciamento. A exigência aos fabricantes de pilhas e baterias terem CTF é apresentada, posteriormente, também na Instrução Normativa IBAMA Nº 11 DE 13/04/2018. Os recicladores e transportadores precisam ter cadastro no CTF, porém sem as demais cobranças. Para os quatro atores envolvidos neste parágrafo, a necessidade de inscrição no CTF também está presente na Instrução Normativa IBAMA Nº 6 de 15/03/2013. Por fim, devem conter, nas embalagens dos produtos, simbologias como descritas na normativa, no que se atenta ao descarte pós-consumo (IBAMA, 2020).

No ano de 2018, a iniciativa passou para a gestão da Green Eletron, uma gestora de logística reversa da ABINEE (Mendes et al., 2016). A Green Eletron é a entidade gestora, representando suas organizações associadas, fundada pela Abinee e Sinaees-SP, que realiza a gestão da Logística Reversa de Pilhas e Baterias, assim como de Eletroeletrônicos. O mecanismo adotado foi a parceria com o comércio individual ou redes varejistas, que disponibilizam o local para a colocação de PEVs, onde o consumidor doméstico deposita seus produtos pós-consumo, após ocorrer a coleta, transporte, consolidação e reciclagem. Tais ações ocorrem por meio do programa Programa Green Recicla Pilhas (Green Eletron, 2019a).

Com o intuito de aumentar a abrangência e coleta do material, alguns estados assinaram termos de compromisso com a gestora, sendo eles: São Paulo, Pernambuco e Paraná (Abinee, 2019). Para o ano de 2019, a gestora contava com 2245 unidades de coleta espalhados pelo Brasil, sendo a sua maior parte na região Sudeste. Juntas, o total de coleta foi de 171,2t de pilhas e baterias recolhidas e destinadas (Green Eletron, 2019b). O sistema de logística está em expansão e espera-se um aumento do quantitativo coletado.

Um tipo especial de baterias são as de chumbo ácido, que possuem legislação individualizada, assim como todo o processo de acordo setorial associado à logística reversa. Esses dispositivos são conhecidos pela sua utilização em automóveis, sendo constituídos por acumuladores e contendo chumbo e substâncias ácidas que têm potencial de causar danos ambientais (SINIR, 2019). No entanto elas possuem características que lhes garantam ser quase totalmente aproveitadas pela reciclagem (IBER, 2019). O acordo setorial, para essa categoria de resíduo, foi assinado, em 2019, sendo gerido pelo Instituto Brasileiro de Energia Reciclável (IBER) que, segundo relatório apresentado, coletou 74% das baterias desse tipo colocadas no mercado, mostrando uma considerável funcionalidade e cobertura.

7.5. Panorama geral

Compactando as informações e datas apresentadas, a Figura 2 traz uma linha do tempo dos atos e legislações que levaram ao estágio atual dos resíduos eletroeletrônicos. Nota-se que as pilhas e baterias foram as primeiras a serem avaliadas, tendo iniciado o seu processo legislativo antes mesmo da PNRS, resultando em ações mais imediatas, logo em 2010, contudo ainda não apresentam um acordo setorial firmado, sendo o sistema de logística reversa por regulamentações. No caso de baterias, o tipo específico daquelas de chumbo ácido tiveram o seu acordo setorial já instaurado em 2019. Seguindo o ritmo, em 2012, as lâmpadas iniciaram os requisitos, para a assinatura do seu acordo setorial, que foi firmado em 2014. No mesmo ano, os representantes do setor de eletroeletrônicos apresentaram a proposta unificada do acordo setorial, todavia somente em 2018 a versão revisada foi finalizada e, em 2019, assinada e, no ano de 2020, decretadas as responsabilidades e metas. Dessa forma, foram os últimos a apresentarem iniciativas em nível nacional.

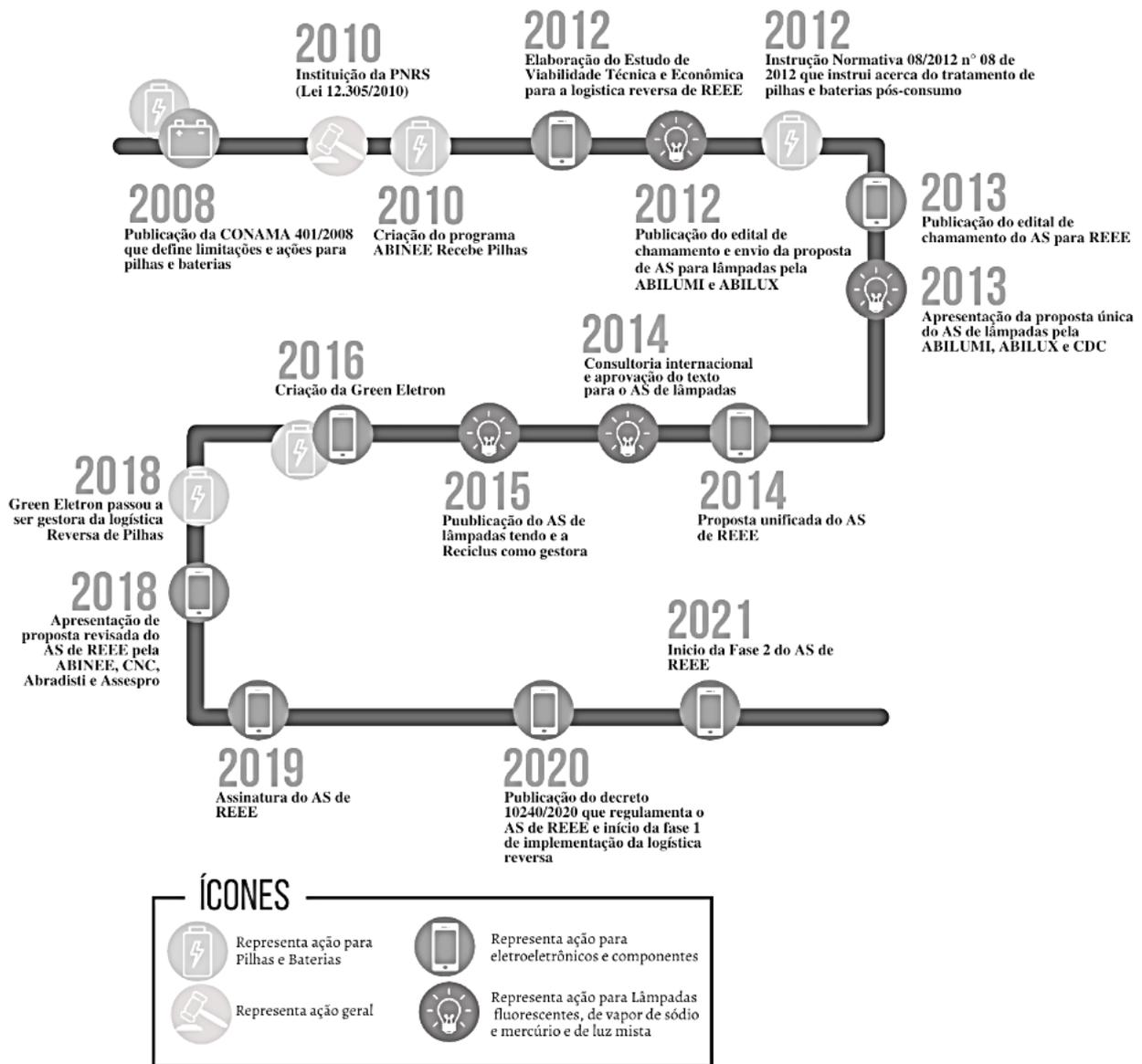


Figura 2. Linha do tempo dos instrumentos dos Sistemas de Logística Reversa de lâmpadas, pilhas e baterias e eletroeletrônicos

Fontes: Green Eletron (2019c), SINIR (2019), SINIR (2018), Fecomércio/RJ (2016).

A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os principais instrumentos descritos na PNRS referentes às três tipologias de produtos resíduos abordadas. Pilhas e baterias são as que mais diferem dos demais por terem como base a regulamentação, não sendo possível, por isso, identificar o agente financiador e as metas. Além disso, o acordo setorial de lâmpadas engloba grandes geradores, enquanto o de eletroeletrônicos apenas geradores domésticos, possuindo assim menor dimensão. Por fim, é possível notar que, em razão do seu período em vigor ser maior, as metas do acordo setorial de lâmpadas são maiores, além de também ser possível acessar seus relatórios e ações de anos passados.

Tabela 1. Comparação dos instrumentos vigentes dos Sistemas de Logística Reversa de lâmpadas, eletroeletrônicos e pilhas e baterias

Situação	Tipo de produto		
	Pilhas e Baterias	Eletroeletrônicos	Lâmpadas
Instrumentos principais da PNRS	Regulamentação	Acordo Setorial e Regulamentação	Acordo Setorial
Equipamentos descritos	Pilhas e baterias portáteis, das baterias chumbo-ácido, automotivas e industriais e das pilhas e baterias dos sistemas eletroquímicos níquel-cádmio e óxido de mercúrio	Equipamentos de origem doméstica até 240V	Lâmpadas Fluorescentes, de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista
Ano de assinatura	2008 e 2012	2019 e 2020	2014
Gestora	Green Eletron	Green Eletron	Reciclus
Atores responsáveis pelo SLR	Fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes e poder público	Fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, entidade gestora, geradores domésticos	Fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, entidade gestora, união, geradores domésticos e geradores não domésticos
Responsáveis pelo financiamento	Não descrito	Fabricantes e importadores	Fabricantes e importadores
Meta de coleta e prazo final	Sem metas	17% em massa colocado no mercado em 2012, até 2025	20% do quantitativo colocado em mercado em 2012, até 2020

Na Tabela 1, é possível visualizar o panorama da regulamentação e respectivos requisitos para a logística reversa de eletrônicos, lâmpadas e pilhas e baterias consumidos no Brasil. Como a regulamentação estabelece a responsabilidade compartilhada, todos os agentes responsáveis devem atuar de forma coordenada com a finalidade de promover o devido gerenciamento desses produtos pós-consumo.

Nos estudos de caso descritos na parte III do livro, são apresentados casos brasileiros de processamento de produtos e materiais pós-consumo da cadeia de eletroeletrônicos. Parte desses materiais têm sido processados com a finalidade de inserção de matéria-prima secundária em cadeias produtivas.

Na Tabela 2, são apresentados os números de pontos de coleta disponíveis no país para a recolha de pilhas, baterias e lâmpadas, distribuídos por municípios. A Green Eletron disponibiliza 6.024 pontos de coleta distribuídos por 665 municípios, em que mais da metade são concentrados em São Paulo. A Reciclus dispõe de 1.988 pontos de coleta e a ABREE 1.293 pontos. A Green Eletron atende 665 municípios, enquanto a Reciclus e a ABREE atendem 412 e 576, respectivamente.

Tabela 2. Municípios atendidos e pontos de coletas das Gestoras Green Eletron (pilhas) ABREE (eletrônicos) e Reciclus (lâmpadas)

Região	Estado	GREEN ELETRON		RECICLUS		ABREE	
		n° municípios	n° pontos	n° municípios	n° pontos	n° municípios	n° pontos
Nordeste	Maranhão	3	37	4	19	10	19
	Alagoas	2	34	4	28	5	11
	Paraíba	0	0	4	15	9	16
	Pernambuco	12	138	13	36	18	29
	Bahia	26	219	29	80	35	63
	Ceará	8	86	12	37	10	21
	Piauí	0	0	3	31	5	9
	Rio Grande do Norte	0	0	7	28	6	13
	Sergipe	2	30	2	18	2	6
	Tocantins	3	13	2	5	6	12
Norte	Pará	11	57	6	11	10	21
	Amapá	1	3	1	11	1	3
	Roraima	1	2	1	1	1	2
	Amazonas	1	18	1	2	3	13
	Acre	1	4	1	1	2	6
	Rondônia	0	0	3	4	13	23
	Distrito Federal	2	152	1	46	1	27
Centro-Oeste	Goiás	15	138	11	41	29	67

MINERAÇÃO URBANA: Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos

	Mato Grosso	9	50	9	21	9	19
	Mato Grosso do Sul	6	59	3	17	12	28
	São Paulo	280	3224	103	645	151	408
	Minas Gerais	55	337	24	77	70	124
Sudeste	Rio de Janeiro	39	723	24	142	32	112
	Espírito Santo	10	110	6	24	9	18
	Paraná	120	367	42	241	26	50
	Santa Catarina	30	106	38	196	38	62
Sul	Rio Grande do Sul	28	117	58	211	63	111
Total		665	6024	412	1988	576	1293

Enquanto a Green Eletron possui uma média de 9 PEVs por município, a Reciclus possui 5 PEVs por município e a ABREE possui 2 PEVs por município. A distribuição não ocorre de forma uniforme, a média foi calculada, em relação ao montante, para possibilitar a comparação entre a atuação das empresas gestoras.

7.6. Conclusões

Os Sistemas de Logística Reversa ainda estão em processo de implementação, porém as gestoras têm trabalhado para que esteja em contínua ampliação e atenda às exigências previstas na legislação. Todos já possuem metas e objetivos estabelecidos, para os pontos de coletas, abrangência da população e de coleta. Os SLR, para as regiões Sul e Sudeste, encontram-se mais bem estabelecidos que os das demais regiões. Mesmo levando em consideração os municípios previstos nos acordos estabelecidos, a abrangência ainda é insipiente e necessita de mecanismos, para a consolidação dos processos ao atendimento das metas estabelecidas por meio dos instrumentos regulamentadores.

Relatório de gerenciamento de lâmpadas pós-consumo de 2019 da Reciclus apresenta um total de 4,6% da meta de recolhimento até o ano de 2021 (Reciclus, 2019). O sistema que envolve eletroeletrônicos é o mais recente, sendo o ano de 2021 o início da implementação do sistema, com a definição de coleta e destinação de 1% do total colocado no mercado no ano-base de 2018 (Decreto nº 10.240/2020). O ponto principal, para o atraso do acordo setorial, foi a discordância entre as partes envolvidas, levando à assinatura sem a participação dos comercializadores dos produtos. Esses foram conferidos posteriormente das suas responsabilidades pelo decreto federal, uma ferramenta compulsória, que tornou a tipologia mais rica em instrumentos. Atualmente, em razão das fases iniciais do sistema, ainda não há disponíveis relatórios de controle para avaliação. No entanto o ano de

2020 apresentou significativo grau de incerteza, por causa da pandemia da Covid-19, o que diminui expectativas quanto à estruturação do sistema ter atingido o propósito acordado.

Além disso, tendo em vista que os três sistemas se baseiam no modelo de ponto de entrega voluntário para a coleta, ocorre uma preocupação como estão distribuídos espacialmente, pois é necessária a movimentação do usuário até o local, reforçando a necessidade de um forte programa de comunicação e educação ambiental. Outro ponto é que são poucas as empresas recicladoras homologadas pelas gestoras, podendo levar à insuficiência para atender os locais previstos nas metas estabelecidas, causando problemáticas, quanto ao alto custo logístico, o que, muitas vezes, inviabiliza economicamente o sistema. Pode ser necessária uma revisão da quantificação, além do valor estabelecido de 1 PEV para cada 25.000 habitantes, levando outros fatores relevantes à geração do resíduo, como é o caso de critérios de renda.

Sobre as metas, podem ser questionadas, por não considerar, além da vida útil do resíduo, o comportamento da população em armazená-lo. Por outro lado, sua presença torna possível mensurar a eficiência dos SLR. De forma que, para a complementação, seria sugerida a utilização de outros indicadores, que devem estar presentes nos relatórios de atividades das gestoras.

Referências

- ABDI - Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2013. Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos: análise de viabilidade técnica e econômica. Brasília: ABDI. Disponível em: <http://www.abdi.com.br/Estudo/Logistica%20reversa%20de%20residuos.pdf>. Acesso em: 20 Fev. 2021.
- Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - Abinee, 2019. Relatório Anual 2018. Março de 2019. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/programas/imagens/rel2018/files/assets/common/downloads/rel2018.pdf?uni=58212caf0918b9a8cbf1aa4129b7b418>>. Acesso em: 11 Fev. 2021.
- BAKHIYI, B.; GRAVEL, S.; CEBALLOS, D.; FLYNN, M. A.; ZAYED, J. Has the question of e-waste opened a Pandora's box? An overview of unpredictable issues and challenges. Environment international. V.110, p.173-192, 2018.
- BOCCHI, N.; FERRACIN, L. C.; BIAGGIO, S. R. Pilhas e baterias: funcionamento e impacto ambiental. Química Nova na escola. V. 11, n. 3, 2000.
- BRASIL, 2010a. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 13 Jan. 2021.
- BRASIL, 2010b. Decreto Nº 7.404, 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 15 Jan. 2021.
- BRASIL, 2013. Edital de Chamamento para a Elaboração de Acordo Setorial para a Implantação Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes. Edital nº 01/2013. Disponível: http://www.mma.gov.br/images/editais_e_chamadas/SRHU/fevereiro_2013/edital_ree_srhsu_18122012.pdf. Acesso em: 10 Fev. 2020.

BRASIL, 2018. Decreto nº 9.470, de 14 de Agosto de 2018. Promulga a Convenção de Minamata sobre Mercúrio, firmada pela República Federativa do Brasil, em Kumamoto, em 10 de outubro de 2013. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2018/decreto/D9470.htm>. Acesso em: 06 Fev. 2021.

BRASIL, 2020. 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. Disponível em: <<http://legis.senado.leg.br/norma/31943255/publicacao/31944079>>. Acesso em: 15. Fev. 2021.

BRASIL, 2017. Decreto nº 9177, de 23 de outubro de 2017. Regulamenta o art. 33 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, e complementa os art.16 e art. 17 do Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010 e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2015-2018/2017/decreto/d9177.htm. Acesso em: 15. Fev. 2021.

BRASIL. Lei nº 13.576, de 06 de julho de 2009. Institui normas e procedimentos para a reciclagem, gerenciamento e destinação final de lixo tecnológico. Disponível em: <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/lei/2009/lei-13576-06.07.2009.html>. Acesso em: 15. Fev. 2021.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Fase 2 – Termos de Compromisso para Produtos Eletrônicos de Uso Doméstico (2017). Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/logisticareversa/wp-content/uploads/sites/27/2018/12/Programa-Descarte-Green-Produtos-eletronicos-de-uso-domestico-termo-de-compromisso-fase-2.pdf>. Acesso em: 15. Fev. 2021.

Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial- CONMETRO, 2016. Resolução nº1, de 5 de julho de 2016. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/diarios/119971539/dou-secao-1-07-07-2016-pg-83>>. Acesso em: 09 Fev. 2021.

Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, 1999. Resolução CONAMA nº 257 de 30 de julho de 1999. Dispõe sobre o descarte, coleta, reutilização, reciclagem e tratamento de pilhas e baterias que contenham em suas composições chumbo, cádmio, mercúrio e seus compostos. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=96661#:~:text=Disp%C3%B5e%20sobre%20o%20descarte%20coleta,c%C3%A1dmio%20merc%C3%A1rio%20e%20seus%20compostos>>. Acesso em: 15. Fev. 2021.

Conselho Nacional do Meio Ambiente- CONAMA, 2008. Resolução CONAMA nº 401, de 4 de novembro de 2008. Estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=589>>. Acesso em: 10 Fev. 2021.

Fecomércio, Seminário Nacional de Logística Reversa. Acordo setorial de lâmpadas, 2016. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/6552138/4177406/AcordoSetorialdeLampadasGeorgesBlumPresidenteExecutivodaABILUMI.pdf>. Acesso em: 11 Fev. 2021.

FERREIRA, A. M.; CHAVES, G. DE L. D. Resolução do CONAMA Nº 401 e a diretiva 2006/66/CE: O impacto para a logística reversa de pilhas e baterias. XVII Simpósio de Engenharia de Produção. Bauru, Unesp, 2011.

Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM, 2020. Situação da Logística Reversa em âmbito federal. 30 Novembro de 2020. Disponível em: <<http://www.feam.br/component/content/article/15/1494->

[situacao-da-implantacao-dos-sistemas-de-logistica-reversa-em-minas-gerais](#)>. Acesso em: 09. Fev. 2021.

GREEN ELETRON, 2019a. Green Recicla Pilhas. 28 de Agosto de 2019. Disponível em:<<https://www.greeneletron.org.br/blog/reciclagem-pilhas-baterias/>>. Acesso em: 12 Fev. 2021.

GREEN ELETRON, 2019b. Green Eletron reciclou mais de 514 toneladas de lixo eletrônico em 2019. Confira outras conquistas!. 19 de Dezembro de 2019. Disponível em: <<https://www.greeneletron.org.br/blog/green-eletron-reciclou-mais-de-514-toneladas-de-lixo-eletronico-em-2019-confira-outras-conquistas/>>. Acesso em: 14. Fev. 2021.

GREEN ELETRON, 2019c. O que é o Acordo Setorial para a Logística Reversa de Eletroeletrônicos?. 01 de Agosto de 2019. Disponível em: <<https://www.greeneletron.org.br/blog/o-que-e-o-acordo-setorial-para-a-logistica-reversa-de-eletroeletronicos/>>. Acesso em: 15. Fev. 2021.

GREEN ELETRON, 2020. Quais pré-requisitos são necessários para ser uma recicladora homologada da Green Eletron?. 30 de Março de 2020. Disponível em:<<https://www.greeneletron.org.br/blog/quais-pre-requisitos-sao-necessarios-para-ser-uma-recicladora-homologada-da-green-eletron/>>. Acesso em: 12 Fev. 2021.

GUARNIERI, P. Logística Reversa: em busca do equilíbrio econômico e ambiental. Recife: Editora Clube dos Autores. 2011.

Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica - Abinee, 2018. Green Eletron passa a gerenciar o Programa de Pilhas e Baterias. 20 de Abril de 2018. Disponível em:<<http://www.abinee.org.br/noticias/com242.htm>>. Acesso em: 12 Fev. 2021.

Instituto Brasileiro de Energia Reciclável- IBER, 2019. ECONOMIA CIRCULAR E A LOGÍSTICA REVERSA DE BATERIAS 3º SEMINÁRIO PARANAENSE. 12 de Novembro de 2019. Disponível em:<[http://www.fiepr.org.br/uploadAddress/7-Amanda-Schneider-AS-Baterias-Chumbo-Acido\[89908\].pdf](http://www.fiepr.org.br/uploadAddress/7-Amanda-Schneider-AS-Baterias-Chumbo-Acido[89908].pdf)>. Acesso em: 06 Fev. 2021.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, 2020. Pilhas e baterias. 28 de Abril de 2020. Disponível em:< <https://www.ibama.gov.br/residuos/pilhas-e-baterias>>. Acesso em: 10 Fev. 2020.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis- IBAMA. Nota Técnica nº 8 de 4 de setembro de 2012. Disponível em:<http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0008-030912.PDF>. Acesso em: 15. Fev. 2021.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis- IBAMA. Nota Técnica nº 11 de 13 de março de 2018. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0011-130418.pdf>. Acesso em: 14. Fev. 2021.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis- IBAMA. Nota Técnica nº 6 de 15 de março de 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/centrais-de-conteudo/ibama-in-6-2013-compilada-in-11-2018-pdf>. Acesso em: 14. Fev. 2021.

MANTUANO, D. P.; ESPINOSA, D. C. R.; WOLFF, E.; MANSUR, M. B.; SCHWABE, W. K.. Pilhas e baterias portáteis: legislação, processos de reciclagem e perspectivas. Brazilian Journal of Environmental Sciences (Online). N. 21, p. 1-13, 2011.

MENDES, H. M. R.; RUIZ, M. S.; FARIA, AC de. Logística Reversa de Pilhas e Baterias: Revisão e Análise de um Sistema Implementado no Brasil. Revista em Gestão, Inovação e Sustentabilidade-Brasília. V. 2, n. 1, p. 81-96, 2016.

Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. Resolução nº1, de 05 de julho de 2016. Disponível em: http://www.lex.com.br/legis_27165526_RESOLUCAO_N_1_DE_5_DE_JULHO_DE_2016.aspx. Acesso em: 14. Fev. 2021.

Ministério do Meio Ambiente - MMA, 2013. Edital nº 01/2013. Chamamento para a Elaboração de Acordo Setorial para a Implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes. Brasília, 2013.

Ministério do Meio Ambiente – MMA, 2019. Acordo Setorial para Implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. Disponível em: <https://sinir.gov.br/images/sinir/Acordos_Setoriais/Eletr%C3%B4nicos/Acordo_Setorial_-_Eletr%C3%B4nicos_sem_anexos.pdf>. Acesso em: 12. Fev. 2021.

Ministério Público do Paraná - MPPR, 2020. MPPR firma acordo para destinação de lâmpadas fluorescentes no estado. Disponível em: <<http://mppr.mp.br/2020/05/22550,10/MPPR-firma-acordo-para-destinacao-de-lampadas-fluorescentes-no-estado.html>>. Acesso em: 07. Fev. 2021.

MOTOROLA, 2020. Reciclagem no Brasil. Disponível em: <<https://www.motorola.com/us/about/recycling-brazil>>. Acesso em: 11 Fev. 2021.

Público nº 002/2014. 07 de Novembro de 2014. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/Media/iema/Downloads/Licenciamentos/20161018%20-%20EDITAL%20DE%20CHAMAMENTO.pdf>>. Acesso em: 09 Fev. 2021.

RECICLUS, 2019. Relatório de Atividades 2019. Disponível em: <https://reciclus.org.br/wp-content/uploads/2021/01/Reciclus-Relatorio_Atividades_2019.pdf>. Acesso em: 10 Fev. 2021.

Samsung, 2021. Programa de Reciclagem. Disponível em: <<https://www.samsung.com/br/support/planet-first/>>. Acesso em: 11. Fev. 2021.

Secretaria Estadual do Meio Ambiente - SEAMA ES, 2013. Edital de Chamamento Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. 07 Novembro de 2014. Disponível em: <<https://iema.es.gov.br/Media/iema/Downloads/Licenciamentos/20161018%20-%20EDITAL%20DE%20CHAMAMENTO.pdf>>. Acesso em: 09 Fev. 2021.

Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos- SINIR, 2020. Baterias de Chumbo Ácido. 29 de Junho de 2020. Disponível: <<https://sinir.gov.br/component/content/article/2-sem-categoria/461-acordosetorialbaterias>>. Acesso em: 10. Fev. 2021.

Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos- SINIR, 2018. Pilhas e Baterias. 22 de Março de 2018. Disponível em: <<https://sinir.gov.br/index.php/component/content/article/2-uncategorised/126-pilhas-e-baterias>>. Acesso em: 12 Fev. 2021.

SOUZA, R. G. E-waste situation and current practices in Brazil. In Handbook of Electronic Waste Management. Butterworth-Heinemann. P. 377-396, 2020.

SMA – SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. Resolução SMA nº 45, de 24 de junho de 2015. Define as diretrizes para implementação e operacionalização da responsabilidade pós-consumo (...). Diário Oficial [do] Estado de São Paulo. Poder Exec., São Paulo, 25 jun. 2015.



CAPÍTULO 8

GESTÃO CIRCULAR DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NAS ORGANIZAÇÕES

Raíssa André de Araujo

Engenheira Ambiental pela UFRJ
Mestranda em Engenharia Ambiental pelo PEA/UFRJ
Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Luciana Contador

Bióloga pela UFRJ
Mestre em Ciências do Mar (USU)
Doutora em Ciências do Meio Ambiente
Universidade Paris VI
Pós doutoranda PPE COPPE-UFRJ

Marianna Ottoni

Engenheira Ambiental pela UFRJ
Mestre pelo Programa de Planejamento Energético -
COPPE/UFRJ

8.1. Introdução

Com os avanços tecnológicos, os equipamentos eletroeletrônicos foram se difundindo na sociedade, tornando-se essenciais para o desempenho de atividades simples ou potencializando as atividades mais complexas. O mesmo ocorreu com as organizações, que fazem seu uso para melhorar a eficiência de processos e controle operacional e, conseqüentemente, transformando-se em fontes geradoras de resíduos eletroeletrônicos. Os resíduos tecnológicos são gerados, em menor quantidade, em comparação aos recicláveis mais comuns, porém seus modelos de gestão e gerenciamento costumam não estar desenvolvidos como os de outras tipologias de resíduos, o que gera uma enorme dificuldade nos setores responsáveis pela gestão de resíduos nas organizações.

O conceito de resíduos eletroeletrônicos pode abranger, além dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), tradicionalmente conhecidos, também as pilhas, baterias, lâmpadas e painéis fotovoltaicos (XAVIER *et al.*, 2020). Tais resíduos merecem atenção específica pelos dados ambientais que podem causar, em caso de disposição inadequada e para o seu gerenciamento, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), tornam-se obrigatórias a estruturação e implementação de sistemas de logística reversa.

Portanto, dadas as suas especificidades, cabe às organizações geradoras desses resíduos um gerenciamento especial e a busca por aprimorar seus processos de forma a tornarem a gestão de seus REEE mais circular e sustentável possível. O presente capítulo visa trazer informações para orientar os gestores no manejo adequado de seus REEEs e os principais desafios encontrados geralmente por tais organizações.

8.2. Modelos de gestão circular de REEE nas organizações

O primeiro ponto da gestão dos REEEs nas organizações é a Política de Gestão, que deve incluir todos os seus colaboradores. O entendimento da importância da gestão de resíduos eletroeletrônicos é o passo inicial para um sistema eficaz. Os colaboradores devem compreender seus papéis e se verem como componente essencial do sistema, pois, sem sua participação efetiva, o melhor modelo de gestão falhará. A sustentabilidade tem estado cada vez mais presente nas missões, visões e valores das organizações, e os REEEs são tão importantes quanto as outras tipologias de resíduos mais tradicionais e devem ser vistos como tal.

Para a definição do modelo de gestão, um caminho indicado é considerar a gestão participativa. Resultados positivos são alcançados quando os envolvidos têm a possibilidade de serem ouvidos e participarem da tomada de decisão. Ao poderem dialogar, para o planejamento do modelo, levarão aos gestores seus pontos de vista, que serão sua realidade, ou seja, o que ocorrerá no cotidiano da organização. Assim, haverá uma chance maior de eficiência na implementação do plano de gestão, pois levará em conta a experiência do funcionário, melhorando a tomada de decisão com modelos mais realísticos e aplicáveis, por meio da valorização do capital humano.

Quando se fala em gestão de resíduos, não se deve pensar estritamente em seu descarte ambientalmente adequado, mas, sim, nas diversas opções de destinações possíveis. A economia circular é uma tendência, pois é uma alternativa ao modelo linear existente, preservando o meio ambiente e agregando valor socioeconômico. Na economia circular, busca-se, além da redução de

resíduos, a preservação do seu valor. O conceito teórico, ao ser aplicado na prática, leva à redução de custos e à sustentabilidade organizacional.

No que diz respeito à gestão, o elemento essencial é a informação. Quais dados tenho e quais preciso obter? Um banco de dados completo e atualizado permite ter um panorama realista da organização e formular ações para a resolução dos problemas encontrados e prever os futuros. Planilhas e sistemas de controle são tendência na gestão de materiais. Um sistema moderno e atualizado possibilita análises que tratam o fluxo de materiais de maneiras eficientes, viabilizando um nível ótimo de aproveitamento. Ademais, deve-se ter pessoal capacitado para operá-lo, aproveitando todo o seu potencial. Um banco de dados útil permite a criação de indicadores, que são ferramentas de gestão que permitem avaliar a performance da situação da organização de maneira qualitativa e quantitativa, ao longo do tempo, além da criação de metas.

De acordo com Salomão (2016), indicadores são métricas que possibilitam obter a informação e acompanhamento do desempenho de metas e objetivos. Um indicador útil deve ser facilmente entendível, estável, estratégico, representativo, relevante, analisável, rastreável e obtido pelos dados disponíveis pela organização (HRONEC, 1994). Os indicadores devem ser criados de forma que sejam eficientes, indicadores complexos podem ser completos, porém não aplicáveis. Devem estar sempre atualizados e em melhoria contínua, além de divulgados interna e externamente, de forma a dar visibilidade às ações ambientalmente corretas da organização. Tais indicadores podem ser mostrados, no Relatório de Sustentabilidade da organização, caso esse documento seja produzido.

De acordo com o objetivo que a organização deseja alcançar, seja de aumentar seu nível de circularidade ou simplesmente atender os requisitos previstos na legislação, são utilizadas metas para verificar o seu encaminhamento. Metas devem ser vistas como etapas a serem cumpridas e levarem em consideração os seguintes princípios: específica, mensurável, atingível, realista e temporizável (TREASE, 2016).

É possível perceber uma relação hierárquica entre indicadores, metas e objetivo (Fig. 1). A hierarquia não é clara para muitas organizações, o que dificulta o sistema de informação e de desempenho. Indicadores mal definidos e implementados levam ao comprometimento de realização de metas, que, conseqüentemente, afetarão o alcance do objetivo principal da organização, sendo, no caso apresentado no presente capítulo, a gestão de resíduos eletroeletrônicos, seguindo as diretrizes da circularidade.

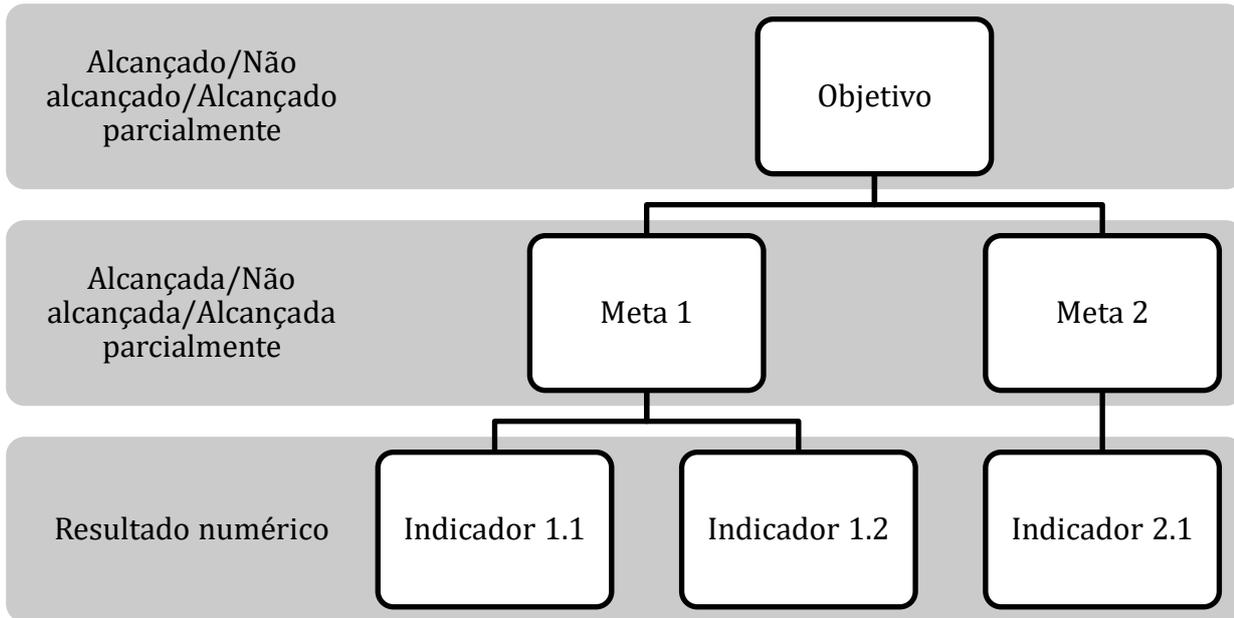


Figura 1. Hierarquia de indicadores, metas e objetivos.

Equipamentos funcionais sem utilização são razões de perda de espaço disponível e é possível que sejam mal utilizados posteriormente. Com um controle dos equipamentos ociosos, em uso e demandados, é viável o remanejamento, buscando o aproveitamento e a redução de custos, evitando a necessidade de novos e, em consequência, o consumo. No caso de haver uma quantidade considerável de equipamentos do mesmo modelo ou tipologia, é possível verificar se há algum equipamento em estoque para a reposição de peças defeituosas. Além disso, é possível ver a data de aquisição dos equipamentos e o tempo de vida útil e, caso sejam identificados tempos menores que os esperados, elaboram-se ações de resolução dos problemas que causem o problema.

Com as informações disponíveis, devem-se ter em mente os R's. Os R's representam uma política que visa reduzir a geração de resíduos no nosso planeta, o que é de extrema importância no que diz respeito a organizações ambientalmente responsáveis. Porém, não somente isso, é necessário aplicá-los, já que não somente causam ganhos na área ambiental, mas também podem gerar economias no orçamento e ganhos sociais. Sua sequência busca manter a retenção de valor do resíduo o maior tempo possível, assim como a economia circular, buscando o maior número de usos possíveis até a disposição (OTTONI *et al.*, 2020).

De acordo com o ciclo técnico da economia circular, são seguidas as sequências que levem à permanência de valor dos resíduos, que incluem, simplificada, o aproveitamento do resíduo sem modificações, como, por exemplo, o reuso, após conserto (reparo e condicionamento), seguido pelo aproveitamento de suas peças e, por fim, à reciclagem dos materiais que o compõem (ELM, 2015). Internamente, é possível realizar até o aproveitamento das peças, desde que haja mão de obra para tal e seja economicamente viável.

Para os dispositivos já utilizados, deve-se proporcionar o reaproveitamento de equipamentos ociosos ou que precisem de pequenos reparos. O aproveitamento de materiais ociosos evita, além do custo de aquisição, o tempo de escolha de um novo equipamento e sua entrega. Equipamentos são “esquecidos” por não suprir a necessidade de determinado setor, porém podem ser utilizados em outros que necessitem de menor desempenho. O mesmo ocorre com reparo, muitas vezes, são facilmente corrigidos ou de baixo custo, mas não acontecem pela organização não possuir interesse ou pessoal capacitado para tal atividade, necessitando de uma nova compra desnecessária, o que acarretará um custo maior.

Não possível o aproveitamento dos equipamentos já utilizados pela organização, a opção é a aquisição de novos. No momento da aquisição, além do preço, a qualidade do equipamento deve ser de igual ou maior importância. As compras inteligentes, selecionando equipamentos melhores, que provavelmente terão uma vida útil maior, em relação a equipamentos mais antigos e baratos, que deverão ser brevemente substituídos, levam à redução da necessidade de adquirir novos equipamentos em médio e longo prazo e possuem vantagens ao se analisar o custo-benefício dessa aquisição. Além disso, deve-se ter conhecimento do histórico da empresa e ver se suas ações condizem com as buscadas pela organização. A construção de cadeias sustentáveis incentiva a priorização e o desenvolvimento de ações socioambientais pelas organizações.

8.3. Desafios na gestão e destinações possíveis para REEE nas organizações

Uma das razões de desfazimento de material nas organizações é a sua obsolescência. Esse fenômeno pode ser minimizado de duas maneiras: na aquisição do equipamento, por meio de compras inteligente; ou por melhorias. Melhorias de peças do equipamento, como, por exemplo, computadores, levam ao aumento da vida útil do equipamento. Com relação a computadores, a escolha de sistemas operacionais possibilita a utilização de equipamentos de menor desempenho, trazendo economias além do hardware também com o software. Outro modo de estender a vida útil do dispositivo são manutenções periódicas, essenciais, mas em grande parte negligenciadas.

Quando o equipamento não possui mais utilização internamente, diversas são as destinações possíveis. Em caso de equipamentos em condições funcionais, a venda e doação são boas opções, com ressalva para a segunda, que gera benefícios sociais que podem ser aproveitados na visão da sociedade com a empresa. A doação de equipamentos não funcionais, para locais que precisam de funcionais, é uma ação enganosa, que somente transfere a obrigação de descarte ambientalmente adequado para outra organização, o que é desvantajoso para quem o recebe, além de ser antiético.

Um ponto relevante no que diz respeito às destinações é o patrimônio. O Patrimônio é o setor que controla o acervo de bens de uma instituição, realizando o controle de materiais, na qual é possível identificar quais e onde estão localizados os bens da organização, sendo um setor obrigatório em muitas instituições. Para o descarte, é necessário que ocorra a baixa de patrimônio, removendo-o do acervo patrimonial. Tal ação é necessária para que a organização tenha total controle de seus bens, evitando futuros aborrecimentos por inconsistências de dados. Além disso, é de extrema importância que a organização que presta o serviço de transporte e destinação do material esteja assegurada de que não há material patrimoniado na carga, pois pode ser contestado futuramente causando até mesmo disputas jurídicas.

Cada vez mais as organizações estão migrando para os sistemas informatizados mais próximos da Indústria 4.0, que armazenam dados estratégicos e, muitas vezes, sigilosos. Para manter a segurança de dados da organização, é necessária a eliminação desses dados antes do descarte, com ações como limpezas de memórias, HD's e cartões de memórias, ou seus danos, com quebras que assegurem a não possível mais utilização do componente. Caso o material possa ser reaproveitado pela organização, para onde o resíduo foi destinado, indica-se a limpeza, que mantém a funcionalidade da peça. Tal segurança pode ocorrer também nas organizações do segmento de resíduos eletroeletrônicos, porém, na parte de assinatura de acordos e contratos, tal ação deve ser acordada, caso a organização para qual o resíduo esteja sendo destinado realize tal serviço.

No caso de equipamentos não funcionais, ou caso a organização não tenha interesse nas soluções anteriormente propostas, deve-se buscar a destinação por organizações formais e ambientalmente adequadas, gerando empregos, evitando os impactos da disposição incorreta e mantendo uma boa relação com os órgãos ambientais. Caso trabalhe com organizações duvidosas, os equipamentos podem ser utilizados, em finalidades não acordadas, podendo causar problemas com segurança de dados e visibilidade da marca. Caso o resíduo acabe com profissionais não capacitados, tratamentos inadequados podem levar prejuízo à saúde dos trabalhadores, como é o caso da queima de fios, além da disposição inadequada causando a contaminação ambiental.

Caso a organização queira ir além de suas instalações, uma opção é incentivar seus colaboradores a trazerem seus resíduos para que sejam entregues em pontos de entrega voluntária. Esse sistema é válido para os resíduos eletroeletrônicos tradicionais e pilhas e baterias, já que os usuários podem destinar lâmpadas sem custo nos locais de compra por meio da logística reversa. Esse sistema está em ampliação, principalmente em locais de ensino, como universidades.

Para a destinação ou simplesmente estocagem, os equipamentos devem ser transferidos de seu setor de origem ao local em que serão armazenados. A transferência de material entre setores, ou para o local de armazenamento temporário, deve manter as características físicas do dispositivo preservadas, sendo realizada com cuidado e segurança. Uma transferência inadequada pode danificar o produto, inviabilizando sua futura utilização ou até mesmo quebrando equipamentos que liberam substâncias perigosas, como, por exemplo, as lâmpadas fluorescentes.

O armazenamento de um material, a ser destinado ou armazenado até futura utilização, deve ser realizado de maneira a não somente manter a organização do ambiente, mas também garantir a segurança do local e das pessoas que ali transitam. O local de armazenamento deve ser seco e protegido das intempéries, evitando assim que os materiais sejam danificados, facilitando seu aproveitamento.

Identificar os materiais mais frágeis ou com risco de contaminação, como monitores, é essencial para evitar sua quebra e, conseqüentemente, riscos à saúde dos colaboradores. Esse tipo de material, além de quebrar com facilidade e espalhar vidro pelo local, pode liberar substâncias tóxicas, como é o caso dos monitores CRT. Tais equipamentos não devem ser empilhados. As lâmpadas fluorescentes e LEDs devem ser armazenadas em suas caixas ou recipientes apropriados, como caixas de papelão e deitadas, para evitar quebras. Caso possível, deixá-las acima do solo, para que um possível vazamento de líquidos não as danifique. Para o armazenamento de lâmpadas fluorescentes, tal local deve ser arejado, pois, em caso de quebra, o vapor de mercúrio pode-se dispersar rapidamente. Além disso, as pilhas e baterias, quando têm sua cobertura rompida, liberam líquidos tóxicos que contaminam o ambiente ao redor. Por isso, é necessário que sejam armazenadas, em sacos ou recipientes plásticos, evitando

vazamentos, além de proteger de alagamentos que poderiam danificar embalagens de papelão, por exemplo.

Quando esgotadas as formas de aproveitamento de valor do resíduo internamente na organização, devem-se buscar organizações que recebam e destinem os equipamentos. Em caso de equipamentos funcionais, as opções são a venda dos equipamentos, com ganhos monetários e solução para o espaço ocupado pelos itens, e a doação, com benefícios socioambientais. Para a doação, locais que aproveitam o material, para beneficiar as populações mais vulneráveis e carentes, pois possuem um benefício social maior, aumentando as oportunidades para essas pessoas.

Quando o equipamento não possui funcionalidade, sua destinação pode ocorrer com ou sem custo, de acordo com quais equipamentos dispõem, mas dificilmente haverá ganhos financeiros. O transporte dos resíduos é uma etapa custosa, e as organizações formais que trabalham no segmento (empresas e cooperativas), dificilmente ganharão lucro o suficiente com a venda de sua parte ao ponto de não cobrar pelo transporte. O transporte só não será cobrado, caso o resíduo destinado tenha alto valor e não possua componentes perigosos, como computadores intactos. As organizações geradoras não geram volume e nem possuem pessoal, para a triagem dos materiais de valor, para que os equipamentos sejam diretamente para os recicladores. Tais limitações não viabilizam a venda de placas de circuito interno, por exemplo, que são as peças de maior valor. Vale ressaltar que, para o manuseio de tais equipamentos, devem-se possuir as licenças cabíveis e cumprir os requisitos de segurança obrigatórios.

No tocante às organizações que farão a triagem, desmontagem e destinação de resíduos certos cuidados devem ser tomados. Ao buscar organizações, é indicado buscar documentos confiáveis, como é o caso dos Manuais de Destinação de REEE produzidos pelo Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) em parceria com a Decania do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), com o Instituto Estadual do Ambiente (INEA-RJ) (XAVIER *et al.*, 2020), ou pedir indicações para órgãos ambientais municipais ou estaduais. Além das indicações, é necessária a comprovação da legalidade das atividades que essa está se propondo a realizar. No que se refere aos órgãos públicos, os processos podem variar, de acordo com as legislações vigentes e priorização das organizações, ocorrendo, muitas vezes, a escolha por meio de editais. Os documentos a serem solicitados são: alvará de funcionamento, alvará do corpo de bombeiros, licença ambiental ou similar, geração de manifesto, geração de nota fiscal, entre outros, que podem variar de estado a estado. Para auxílio dessas informações obrigatórias, sugere-se entrar em contato com especialista da área e o órgão ambiental. Outro ponto importante é a validade dos documentos, que, mesmo existentes, não possuem valor legal após o prazo determinado. Para a licença ambiental, muitas vezes, é possível realizar essa verificação online pelo site do órgão ambiental. Em alguns casos, como o de lâmpadas fluorescentes, há a necessidade da geração do certificado de descontaminação, que possuem componentes de alta toxicidade e necessitam de um tratamento. Verificações, como visitas ao local, buscar as destinações aplicadas ou feedback de antigos clientes podem ser solicitadas, porém não são obrigatórias.

Confirmado o serviço, requisitos legais devem ser combinados. Alguns equipamentos podem conter logomarcas ou informações que restringem a sua utilização, o que deve estar previsto no contrato do serviço. Algumas organizações possuem o serviço adicional de destruição de dados, que são responsáveis por apagar as informações disponíveis nos equipamentos ou inviabilizar a sua obtenção pelos componentes que as possuem. Em caso do não cumprimento dos termos descritos no contrato de serviço, ações judiciais podem ocorrer.

No momento da saída do resíduo da organização, deve-se ser gerado o manifesto de resíduos, termo utilizado para a documentação no estado do Rio de Janeiro, mas variante para os outros estados. Neste documento, são definidas a massa, características dos resíduos, além dos dados do gerador, transportador e destinador final do resíduo, que poderá realizar a disposição final. Outro documento também utilizado é o termo de destinação, que identifica todos os equipamentos destinados, sua quantidade e funcionalidade. Tais documentos devem ser arquivados por pelo menos cinco anos, resguardando-se em caso de solicitação do órgão ambiental.

Todas as etapas e ações descritas até aqui devem estar presentes, no plano de gerenciamento de resíduos da organização, que deve conter todas as tipologias de resíduos gerados, as etapas de gerenciamento, até as destinações finais propostas. Mesmo não sendo obrigatória, para muitas tipologias de organizações, traz vantagens como maior conhecimento dos resíduos da organização, redução de custos, melhor adequação das normas e até mesmo um marketing verde (EJEAmb, 2018). No caso da já existência deste documento, uma atualização pode ser feita englobando a tipologia dos REEEs.

Mesmo com o gerenciamento consolidado e implementado, deve-se ter em mente que pode ser aprimorado. Além de revisões, deve-se propor de maneira participativa a melhoria contínua dos procedimentos adotados, buscando sempre alcançar o maior potencial possível de eficiência, ganhos em sustentabilidade e qualidade. As ferramentas e métodos de gerenciamento de qualidade podem ser utilizadas na identificação de problemas, análise das possíveis causas, atuação para a correção desses problemas e controle e validação das ações efetuadas (FIALHO, 2020). Para cada uma dessas etapas, há ferramentas e metodologia específicas, que podem ser combinadas para alcançar os resultados mais positivos para organização e sua gestão/gerenciamento de REEE.

8.4. Conclusões

As informações passadas neste capítulo possuem como finalidade informar os gestores das organizações geradoras os principais pontos da gestão e do gerenciamento interno dos REEEs. Esses dados auxiliarão na implantação ou melhoramento dos procedimentos, dentro das organizações, levando a melhores resultados na logística e controle dos eletroeletrônicos.

A definição do plano de gestão é o primeiro e principal passo, a partir do qual será definido o objetivo da organização, que pode ser desde cumprir as obrigatoriedades definidas pelo órgão ambiental até destacar-se em ações de circularidade. A visão de oportunidade é a resposta, adaptando-se às novas demandas, evitando gastos e gerando benefícios à organização.

Cabe destacar, ainda, que o gerenciamento deve ser pensado de modo que proporcione a valorização do produto, uso eficiente de recursos e, conseqüentemente, redução de cobranças ambientais. A organização deve trabalhar de forma participativa para ultrapassar seus desafios, sempre em um processo contínuo de melhoria, atingindo objetivos cada vez maiores e ousados, especialmente no que tange aos resíduos eletroeletrônicos.

Referências

- EJEAMB, 2018. PGRS: Vantagens de tê-lo em uma organização. 22 Jun. 2018. Disponível em:< <https://ejeamb.com.br/pgrs-vantagens-de-te-lo-em-uma-organizacao/#:~:text=O%20PGRS%20garante%20muitos%20benef%C3%ADcios,PGRS%20reduz%20consideravelmente%20os%20custos.>>. Acesso em: 28 Nov. 2020.
- ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. RUMO À ECONOMIA CIRCULAR: O RACIONAL DE NEGÓCIO PARA ACELERAR A TRANSIÇÃO. [S. l.: s. n.], 24/11/2015. Disponível em: https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/Rumo-%C3%A0-economia-circular_SumarioExecutivo.pdf. Acesso em: 2 set. 2020.
- FIALHO, G.O.M., 2020. Notas de aula de Gestão de Projeto da Escola Politécnica da UFRJ (EEH592).
- HRONEC, Steven M. Sinais vitais: usando medidas do desempenho da qualidade, tempo e custo para traçar a rota para o futuro de sua empresa. Makron Books, 1994.
- MOTTA, L. B., BARRETO, R. D. C., & XAVIER, L. H. D. S. M., 2019. Uso de indicadores como ferramenta para o planejamento de um modelo de gestão de resíduos eletroeletrônicos em instituições públicas. Jornada de Iniciação Científica (JIC) e Jornada de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (JIDTI) do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).
- OTTONI, M., DIAS, P., XAVIER, L.H., 2020. A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production* 261,120990.
- PEREIRA, S. S., CURI, R. C., & CURI, W. F., 2018. Uso de indicadores na gestão dos resíduos sólidos urbanos: uma proposta metodológica de construção e análise para municípios e regiões. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 23(3), 471-483.
- SALOMÃO, A., 2016. Entendendo os conceitos de Objetivos, Indicadores e Metas. 31 de maio de 2016. Disponível em:< <https://www.linkedin.com/pulse/entendendo-os-conceitos-de-objetivos-indicadores-e-metas-salom%C3%A3o/?originalSubdomain=pt>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- TREASE, 2016. Tudo que você precisa saber sobre Definição de Metas para transformar sua empresa em uma “Tropa de Elite” dos resultados. 16 de março de 2016. Disponível em:< <https://www.treasy.com.br/blog/definicao-de-metas/>>. Acesso em: 11 mar. 2021.
- XAVIER, L.H., OTTONI, M. S.O., ARAUJO, R.A., CUGULA, J.S., CONTADOR, L., PETRUNGARO, G.N., ABREU, L. P. P., SANTOS, L.A., REBELLO, R.Z., L.P.P, GOMES, C.F., SIERPE, R., MANÇANO, M.R., CARDOSO, E.R., ROMAY, K.V.M., SUEMITSU, W., CALDAS, M.B. Manual de destinação de resíduos eletroeletrônicos. Orientações à sociedade sobre como dispor adequadamente os resíduos eletroeletrônicos no estado do Rio de Janeiro. 3ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI 2020.



CAPÍTULO 9

GEOPROCESSAMENTO NA GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS NO BRASIL

Jéssica dos Santos Cugula

Graduada em Engenharia Ambiental pela UFRJ

Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Ricardo Sierpe Vidal Silva

Geógrafo pela UFRJ

Mestre e Doutor em Geociências PPGEQ/UFF

Bolsista PCI-DA CETEM/MCTI

9.1. Introdução

O acesso à informação de forma integrada e generalizada possibilitou o advento de diversas tecnologias, entre elas, encontram-se as ferramentas de Sistema de Informação Geográfica - SIG, que teve sua popularização na década de 90 (CHANG, 2016). Um SIG consiste em um conjunto de hardware e software da computação que permite a análise de dados espaciais e não espaciais, no qual podem ser integrados à localização e aos atributos que definem tal localidade, de forma a fornecer ao usuário todas as informações necessárias e inter-relacionadas em uma mesma base (DAVIS *et al.*, 2001) (CHANG, 2016). Quando a análise geoespacial requer que os dados tratados estejam georreferenciados, ou seja, localizados no espaço e projetados de forma cartográfica, o Geoprocessamento é o conjunto de mecanismos destinados ao manejo dessas informações, sendo executado de forma fundamental pelos Sistemas de Informação Geográfica (DAVIS *et al.*, 2001) (NERIS, 2011) (HOFER *et al.*, 2017).

Atualmente, o uso do Geoprocessamento é realizado, em grande escala e para diversas utilidades, tendo em vista a praticidade do modelo de estudo, que pode ser realizado tanto em várias localidades, ao mesmo tempo, quanto de forma remota, sem necessidade de visita ao local. Dada sua versatilidade, a ferramenta pode auxiliar no aprimoramento da gestão de resíduos, em suas diversas fases, e muitos são os exemplos da aplicação do georreferenciamento nessa área do conhecimento. Paz *et al.* (2020) estudaram o comportamento do descarte irregular e realiza uma proposta de alocação de pontos de coleta regulares para resíduos da construção civil na Região Metropolitana de Recife. Ainda, De Alvarenga (2015) propôs a distribuição de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) para a coleta seletiva em Viçosa (MG) e Moliner *et al.* (2010) analisaram as melhores localidades para a instalação de Ecopontos na província espanhola de Castellón. A problemática da geração e gestão de resíduos é contemporânea e discutível. No presente capítulo, a abordagem focará no auxílio dos dados georreferenciados para o gerenciamento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE).

9.2. Georreferenciamento na gestão de REEE

Resíduo eletroeletrônico possui uma definição não consensual. De acordo com StEp (2014), os REEEs são aqueles originados, a partir de dispositivos que necessitam de energia, para o seu funcionamento. Essa tipologia de resíduos é multimaterial, isto é, composta por diversas matérias-primas distintas, entre elas, existem as que os configuram como perigosos, como os metais pesados (Hg, Pb, Cd, entre outros) e as substâncias químicas tóxicas (antichamas, poluentes orgânicos persistentes, entre outros) (CUCIELLA *et al.*, 2015). No entanto são considerados estratégicos, por também serem produzidos com metais valiosos (ex. Au, Ag, Pd), garantindo a existência de um alto valor agregado (BAKHIYI *et al.*, 2017). Além disso, estão entre as tipologias que mais crescem no mundo, com taxa de 2 Mt por ano (FORTI *et al.*, 2020). Todos esses fatores combinados garantem a necessidade de uma gestão inteligente e integrada para esses resíduos, garantindo a implementação da circularidade, incentivada por um modelo econômico circular, por meio de técnicas de aproveitamento do valor econômico, no fim do ciclo de vida do eletroeletrônico, como a recirculação e seus R's: reparo, restauração, reuso, remanufatura e reciclagem, além da integração com técnicas de mineração urbana, que garante a extração das partes valiosas, diminuindo a necessidade da impactante mineração tradicional (XAVIER & LINS, 2018).

A discussão com o objetivo de garantir um modelo de gestão para os REEEs teve seu início, em 2010, com a regulamentação da Lei 12.305 Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), definindo, além de diversas outras obrigatoriedades, a implementação de sistemas de logística reversa - SLR para esse tipo de resíduos. No mesmo ano, o decreto 7.404/2010 apresenta os Acordos Setoriais (AS) como o instrumento utilizado para garantir a responsabilidade compartilhada dos atores da cadeia do eletroeletrônico (até mesmo daqueles que não o assinarem), e os termos de compromisso a opção para aplicação do sistema de retorno quando não existe a abrangência do AS. Com isso, após um longo período de discussão e pouca movimentação nesse sentido, o decreto 10.240/2020 finalmente instaurou o AS para os REEEs, garantindo o estabelecimento do SLR em grande parte do território nacional nos anos seguintes.

Um Sistema de Logística Reversa (SLR) é definido pela PNRS, como uma operação logística composta por um conjunto de ações, cujo intuito é garantir a coleta e retorno dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para que possa ser reaproveitado em ciclos produtivos ou ter alguma destinação final ambientalmente adequada (Brasil, 2010a). A sua implementação é responsabilidade dos gestores designados pelos AS e, portanto a ordem de manejo do sistema pode variar, sendo a orientação mais padronizada: coleta, armazenamento, transporte, processamento e descarte adequado dos rejeitos (MENDES, 2017). Para garantir o sucesso da aplicação, é necessário um estudo prévio da localidade, avaliando o comportamento de geração e descarte dos REEEs, entendendo que um dos grandes problemas logísticos aos sistemas de retorno no Brasil é o fato da sua larga escala territorial, geração dispersa e polarização das organizações recicladoras.

A porta de entrada dos resíduos no SLR é pelas organizações de coleta. Existem algumas categorias altamente aplicadas: coleta porta a porta, campanhas de coleta e os pontos de entrega voluntária (PEVs). O método porta a porta é aplicado como iniciativa pública, em alguns municípios do Brasil, no entanto a sua problemática, quando se pensa no sistema nacional, é quanto à estrutura de transporte, por exemplo, é fácil visualizar um caminhão de coleta em grandes metrópoles como São Paulo e Rio de Janeiro, já que grande parte do território é urbano e possui numerosas cooperativas e empresas que tratam esses resíduos. Em termos de localidades remotas, a manutenção de um sistema integrado e constante, além de muito difícil, seria altamente custoso, remetendo aos problemas logísticos já mencionados. Já as campanhas são iniciativas independentes de recicladoras, prefeituras ou parcerias, porém o modelo não garante regularidade ao descarte, remetendo à disposição da população de estocar o resíduo em casa, além de depender de uma publicidade bem-sucedida.

Os PEVs são coletores de metal ou plástico que precisam ser adequados para receber um certo tipo de resíduo. Além de públicos, podem ser posicionados de maneira a otimizar a recepção e seu corpo utilizado para a publicidade e conscientização do ato (CALACHE E CAMARGO, 2016; TEIXEIRA E SÁ, 2019). Esse método possibilita o acesso ao descarte por mais pessoas, mas exige também uma maior disposição por parte da população (BESEN *et al.*, 2017). O decreto 10.240/2020 define a implementação de PEVs como forma de coleta no SLR, explicitando ainda nove parâmetros em seu artigo 48º que garantem uma seleção otimizada ao endereço do ponto, que está apresentado na Tabela 1. Estudos acerca da alocação de PEV são um ponto-chave para o bom rendimento do SLR, para isso, sua implementação precisa depender da análise das características locais (TEIXEIRA E SÁ, 2019). Nesse caso, posicionar um PEV depende de uma análise multivariável e espacial, que pode ser realizada sob a orientação dos softwares GIS e o Geoprocessamento.

Tabela 1. Parâmetros para instalação de PEVs apresentados pela legislação

Parâmetro	Descrição
I	Quantidade de domicílios com energia elétrica
II	Estimativa da quantidade de produtos eletroeletrônicos e de seus componentes comercializados no mercado interno
III	Estimativa da quantidade de produtos eletroeletrônicos e de seus componentes descartados pelos consumidores anualmente
IV	Demonstração da capacidade de financiamento do sistema de logística reversa
V	Distribuição geográfica do uso de produtos eletroeletrônicos e de seus componentes
VI	Dados demográficos, tais como população, densidade populacional e quantidade de pessoas residentes na área urbana
VII	Distribuição demográfica das atividades econômicas
VIII	Distância de deslocamento dos consumidores aos pontos de recebimento
IX	Infraestrutura atual e futura do País, para gerenciamento, transporte e destinação final ambientalmente adequada aos produtos eletroeletrônicos

Fonte: Brasil (2020)

Um tipo de aplicação do geoprocessamento pode se dar em estudos cujo objetivo é dimensionar a rede de PEVs. Nesse caso, é recorrente o uso de razões com as variáveis de população ou com a geração de REEE, a exemplo, o caso da ABDI (2013) que define 1 PEV, a cada 25.000 habitantes, ou até mesmo outras metodologias que buscam considerar mais fatores, principalmente aqueles que influem na produção de resíduos, como variáveis socioeconômicas (OTTONI *et al.*, 2020a). Há também as quantificações por razões espaciais específicas, como Scremin (2007) que relaciona o número de PEVs com a área urbana e o raio de abrangência, que varia de acordo com a topografia. Em todos os casos, as análises podem ser realizadas, utilizando um dos diversos softwares de SIG, seguindo as fases simplificadas de adquirir o arquivo vetorial da área de estudo, cujas feições representem o nível territorial da análise; preencher a tabela de atributos com as variáveis consideradas e, no fim, realizar contas entre as colunas, para gerar um mapa final, cuja classificação representa a quantidade de PEV para cada local.

Após definir quantos PEVs certa localidade deverá ter para garantir o maior acesso, é preciso entender onde posicioná-los, sendo novamente possível contar com o auxílio da ferramenta em questão. O estudo de Araujo *et al.* (2020a), por exemplo, faz uso da Análise Multicritério, uma aplicação em SIG preocupada em designar áreas com o objetivo de serem utilizadas para certa atividade por meio de vários dados georreferenciados, na cidade de São Paulo, um dos polos de geração de REEE (EASTMAN, 1999). A sua avaliação utiliza como parâmetros os pontos definidos no decreto 10.240/2020 (Tabela 1), no entanto foi necessário realizar sua conversão, em variáveis reais, tais como: acesso à energia elétrica, geração de REEE, índice de desenvolvimento humano municipal (IDHM), renda, população, entre outros. Nesse caso, os atributos foram padronizados em uma escala de pixels definida e foi realizada uma ponderação entre eles de forma que cada parâmetro tivesse o mesmo peso. Como resultado, foi gerado um mapa classificado em faixas de aptidão que apresentou as localidades mais

ótimas à aplicação de PEVs. O estudo mostrou como um método de análise complexo pode ser simplificado com o uso do georreferenciamento. Sendo assim, um processo muito indicado para fases iniciais de planejamento da gestão.

Pensando nas diferentes fases dos SLR, no território brasileiro, sabendo que estados como Minas Gerais, Paraná, Pernambuco e São Paulo já têm um sistema mediante Termo de Compromisso, as ferramentas de geoprocessamento também auxiliam na manutenção (CARDOSO *et al.*, 2019). A utilização de dados georreferenciados de PEVs já existentes, comparados com variáveis que influem na alocação, permite avaliar se de fato o alcance é suficiente ou o ponto está sendo apenas um custo a mais. Ademais, tal avaliação geraria resultados quanto a vazios de coleta, ou seja, pontos recomendáveis para localizar PEV, mas que não contêm nenhuma (ARAUJO *et al.*, 2020b). Dessa forma, a ferramenta auxiliará na otimização constante do sistema, considerando as mudanças temporais. As três aplicações do georreferenciamento podem ocorrer de forma integrada de maneira a garantir o sucesso na coleta e primeira fase da gestão dos REEE, como é apresentado na Figura 1.

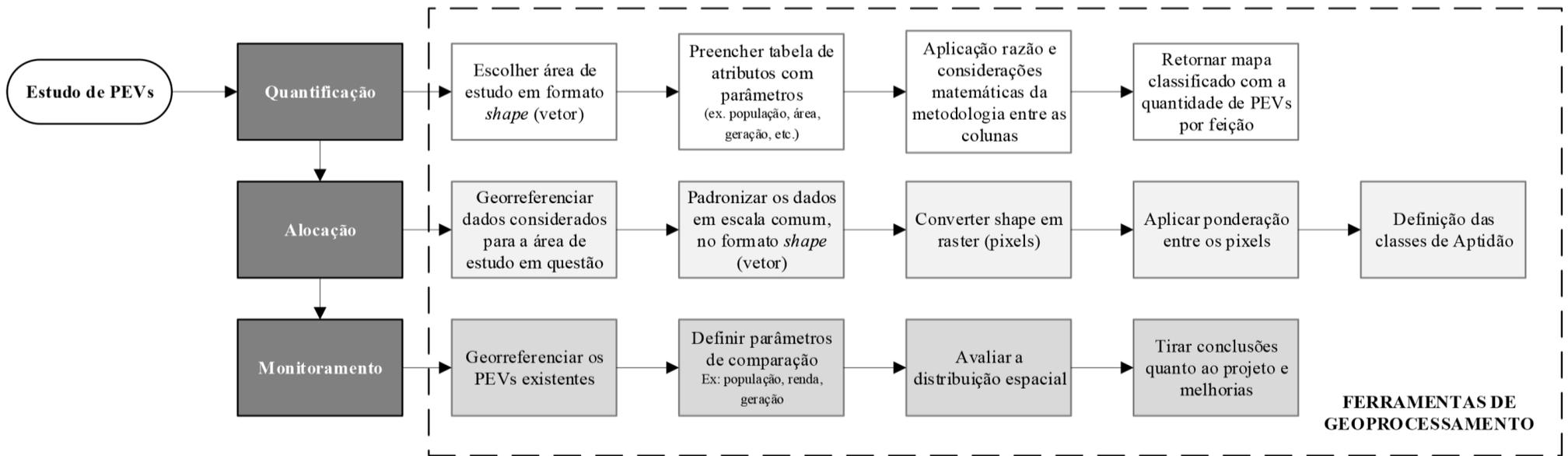


Figura 1. Aplicação do Geoprocessamento no Estudo de PEVs.

Fonte: Adaptado de Ottoni *et al.* (2020), Araújo *et al.* (2020a; 2020b).

Expandindo para as próximas fases da gestão, o georreferenciamento também pode ser utilizado para o manejo da eficiência. A utilização de dados georreferenciados tem várias funcionalidades, nesse sentido, como garantir o conhecimento e distribuição de áreas de maior geração de REEE, localização de recicladoras por meio das quais propor rotas de transporte, como é realizado por Cugula *et al.* (2020), na cidade de São Paulo e Ottoni *et al.* (2020b), para a cidade do Rio de Janeiro. As lacunas mais notáveis, nos sistemas de gestão de resíduos, são referentes à integração da cadeia, ao acesso de informações pelo consumidor e à má estruturação da coleta, problemas esses com grande potencial para serem trabalhados com geoprocessamento (SILVA, 2017). Dessa forma, tais ferramentas são úteis para a proposta e estruturação dos sistemas de logística reversa, tendo suas aplicabilidades mais recorrentes apresentadas na Figura 2, com a avaliação de pontos de alta geração de REEE, seguido pelo estudo de locação dos pontos de coleta e, por fim, da definição de rotas otimizadas.

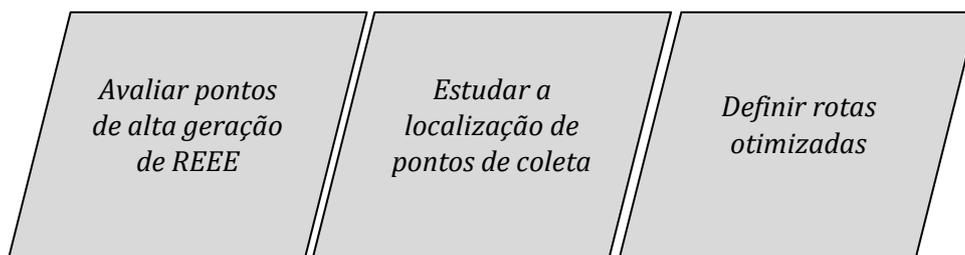


Figura 2. Geoprocessamento nas etapas da gestão de REEE

9.3. Conclusões

Mapear as funcionalidades da cadeia de gestão é uma excelente forma de garantir a integração dos setores e, com isso, a melhoria e crescimento da logística reversa no Brasil. Além disso, entender a distribuição dos pontos de entrega de REEE, dos locais de maior geração e das recicladoras do sistema é uma maneira de conhecer as localidades de eficácia e aquelas que falham nisso, requisitando intervenção mais urgente. Dessa forma, o desenvolvimento de um banco de dados georreferenciados tem um papel relevante, especialmente para sanar problemas relativos à logística.

Diversas são as ferramentas de SIG que permitem análises voltadas para a gestão dos REEEs, algumas de código aberto e gratuitas. Dessa forma, são uma excelente opção para os gestores dos sistemas, principalmente no momento decisivo de pós-acordo setorial, que demanda a coleta e destinação adequada de 17% em cinco anos, com atendimento do SLR em 400 municípios-alvo.

A expansão de trabalhos, mencionados no presente capítulo, para as localidades com maior potencial de gerar resíduos eletroeletrônicos, pode ser realizada pelos gestores dos SLR, como forma de garantir o auxílio e rapidez em sua implementação. É preciso que mais tecnologias e gestão de dados integradas ocorram para garantir avaliações mais eficientes e representativas. Conseguir a participação popular para descarte correto dos REEE é uma tarefa árdua de acessibilidade e conscientização, que pode ser realizada, por meio de campanhas frequentes de educação ambiental, de PEVs estrategicamente dispostos e, ainda, pelo tratamento e processamento de forma otimizada, mais amplo e com menos

gastos, itens essenciais para o sucesso e expansão desses sistemas reversos, em prol de garantir a circularidade e sustentabilidade no segmento dos eletroeletrônicos.

Referências

Agência Brasileira De Desenvolvimento Industrial (ABDI), 2013. Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Disponível em: http://www.abdi.com.br/Estudo/Logistica%20reversa%20de%20residuos_.pdf. Acesso em: 12 de março de 2020.

ARAUJO, R.; CUGULA, J.; APOLONIO, L.; GOMES, C. F. M. S.; OTTONI, M.; XAVIER, L. H., 2020a. Alocação de pontos de entrega voluntária de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos na cidade de São Paulo por meio de análise multicritério em SIG. XI Fórum internacional de Resíduos Sólidos (FIRS-2020).

ARAUJO, R.; CUGULA, J.; APOLONIO, L.; GOMES, C. F. M. S.; OTTONI, M.; XAVIER, L. H., 2020b. Spatial distribution analysis of e-waste Voluntary Delivery Points (VDP) by Green Eletron manager in São Paulo city (SP, Brazil). 5th Symposium on Urban Mining And Circular Economy (SUM 2020).

BAKHIYI, B.; GRAVEL, S.; CEBALLOS, D.; FLYNN, M. A.; ZAYED, J., 2018. Has the question of e-waste opened a Pandora's box? An overview of unpredictable issues and challenges. Environment international 110, 173-192.

BESEN, G. R., GÜNTHER; W. M. R., RIBEIRO; H., JACOBI, P. R.; DIAS, S. M, 2017. Gestão da coleta seletiva e de organizações de catadores: indicadores e índices de sustentabilidade. São Paulo: Faculdade de Saúde Pública/USP.

BRASIL, 2010a. Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: www.planalto.gov.br/ccivil03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 dez. 2020.

BRASIL, 2010b. Decreto Nº 7.404, 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm. Acesso em: 20. Dez. 2020.

BRASIL, 2020. Decreto Nº 10.240, 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=389786>. Acesso em: 20. Dez. 2020.

CALACHE, L. D. D. R.; CAMARGO, V. C. B., 2016. Proposta de um método de localização e alocação de pontos de coleta seletiva. Pesquisa Operacional para o Desenvolvimento 8, n. 2, 137-162.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V., 2001. Introdução à ciência da geoinformação. INPE. P. 345.

CARDOSO, E., ROTOLO; M., VALLE, T. F.; OTTONI, M. S. O.; NASCIMENTO, H.F., 2019. Desafios da Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos no Brasil. Revista Ineana 11, 7-19.

- CHANG, K, 2016. Geographic information system. *International Encyclopedia of Geography: People, the Earth, Environment and Technology*, 1-10.
- CUCCHIELLA, F., D'ADAMO, I., KOH, S. L., ROSA, P., 2015. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, 263-272.
- CUGULA, J.; APOLONIO, L.; ARAUJO, R.; OTTONI, M.; XAVIER, L. H., 2020. E-Waste hotspots and best routes analysis for Reverse Logistics in the city of São Paulo, Brazil. 5th Symposium on Urban Mining And Circular Economy (SUM 2020).
- DE ALVARENGA, J. C. F., 2015. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: uma análise da distribuição espacial dos pontos de entrega voluntária de material reciclável em Viçosa/MG. *Revista Políticas Públicas & Cidades* 2, 2359-1552.
- EASTMAN, J. R., 1999. Multi-criteria evaluation and GIS. *Geographical information systems* 1, n. 1, 493-502.
- FORTI, V., BALDE, C. P., KUEHR, R., & BEL, G., 2020. 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: 21. Dez. 2020.
- HOFER, B., MÄS, S., BRAUNER, J., & BERNARD, L., 2017. Towards a knowledge base to support geoprocessing workflow development. *International Journal of Geographical Information Science* 31, n.4, 694-716.
- MENDES, H. M. R., 2017. Análise de experiências internacionais com a logística reversa de eletroeletrônicos: comparação com a realidade brasileira e recomendações. São Paulo, 165p.. Dissertação (mestrado) – Universidade Nove de Julho – UNINOVE.
- MOLINER, E.; MUÑOZ, C.; GARRAÍN, D.; VIDAL, R., 2010. Sistemas de información geográfica para evaluar la disponibilidad de puntos limpios en la provincia de castellón. XIV International Congress On Project Engineering.
- NERIS, F., 2011. Geoprocessamento para Geoprocessamento para Projetos Ambientais. UNESC. P.99.
- OTTONI, M.; ARAUJO, R.; XAVIER, L. H., 2020a. Quantificação de pontos de entrega voluntária (PEVs) de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) na cidade do rio de janeiro. XI Fórum internacional de Resíduos Sólidos (FIRS-2020).
- OTTONI, M.; DIAS, P.; XAVIER, L. H., 2020b. A Circular Approach to the E-Waste Valorization Through Urban Mining in Rio De Janeiro, Brazil. *Journal of Cleaner Production* 261, 120990.
- PAZ, D. H. F.; LAFAYETTE, K. P. V.; SOBRAL, M. C. M., 2020. Management of construction and demolition waste using GIS tools. In *Advances in Construction and Demolition Waste Recycling*, 121-156.
- SCREMIN, L. B., 2007. Desenvolvimento de um sistema de apoio ao gerenciamento de resíduos de construção e demolição para municípios de pequeno porte. Florianópolis, 121p. Dissertação (mestrado)- Universidade Federal de Santa Catarina.

SILVA, W. M. S., 2017. Geoprocessamento na gestão sustentável da cadeia de suprimentos de aparelhos de telefonia móvel. Santo André, 125p. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do ABC.

STEP INITIATIVE, 2014. One global definition of E-waste. Bonn: UNU.

TEIXEIRA, C. S.G., DE SÁ, S. T. F., 2019. A importância da logística reversa para implantação de uma política pública efetiva nos municípios brasileiros. Educação Ambiental em Ação 18 n.69.

XAVIER, L. H.; LINS, F. A. F., 2018. Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil. Brasil Mineral 379, 22-26.



CAPÍTULO 10

SISTEMAS INFORMATIZADOS PARA A GESTÃO DE REEE

João Coelho Garcias Neto

Análise e Desenvolvimento de Sistemas
pela Universidade Leão Sampaio
Mestre em Engenharia de Software

CESAR School

Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ

Mestre e Doutora em Engenharia de
Produção pela COPPE/UFRJ

Pesquisadora Titular CETEM/MCTI

Rodrigo Pessoa Medeiros

Designer pela Faculdade Marista

Mestre em Tecnologia e Arte Digital

Universidade do Minho

Doutor em Ciência da Computação pelo

Centro de Informática Cin UFPE

Professor do IFPB

10.1. Introdução

O uso de sistemas de informação ou sistemas informatizados tem como objetivo auxiliar os processos de estruturação, gerenciamento e decisão, no âmbito operacional ou administrativo e demanda uma estrutura adequada de *hardware* e *software*. O principal objetivo da implementação de sistemas informatizados é reduzir o custo de gerenciamento e, ao mesmo tempo, reduzir o nível de incerteza e otimizar os processos decisórios. No âmbito da gestão de resíduos, poucos sistemas encontram-se estabelecidos no Brasil com o propósito de viabilizar o gerenciamento ambiental, ou mais especificamente a gestão de resíduos.

No segmento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), há ainda menos recursos informatizados que viabilizem desde a estruturação das cadeias de suprimentos até o auxílio ao processo decisório. Desta forma, os processos relacionados à gestão de REEE são adaptados de processos tradicionais, como aqueles próprios para o gerenciamento de fluxos e estoque, gerenciamento contábil e outros. Para a implementação de soluções informatizadas adequadas aos requisitos dos sistemas de logística reversa, é necessário entender o cenário atual da geração dessa categoria de resíduos e suas especificidades, bem como os requisitos legais aplicáveis.

O volume de geração de REEE, no Brasil, em 2019, foi estimado em mais de 2 milhões de toneladas, o que equivale a mais de 10 quilos por habitante anualmente. Esse volume não é gerado de modo uniforme entre os estados ou mesmo as regiões do país. Verifica-se que a região Sudeste representa o maior polo de produção e consumo de equipamentos eletrônicos, mas não se observa o quantitativo, a vida útil média, tipologias prioritárias ou as marcas dos equipamentos descartados. Se informações como estas estivessem disponíveis de modo sistematizado, seria possível a elaboração de políticas públicas, bem como estratégias direcionadas para o gerenciamento eficaz e processos decisórios mais assertivos dos REEE.

Encontra-se em desenvolvimento no Brasil a cadeia reversa de gestão de REEE. Vários modelos de negócio encontram-se em fase de estruturação. A complexidade e diversidade observada, nos tipos de materiais, partes e componentes dos equipamentos eletroeletrônicos, demandam maior variedade de procedimentos para a triagem, desmontagem, segregação e processamento dos REEE. Por exemplo, o processo para o gerenciamento de lâmpadas pós-consumo requer processos bastante diferenciados do processamento de placas de circuito impresso ou monitores. Outro aspecto relevante, na cadeia reversa de REEE, é a coleta de volumes significativos que compensem os custos de processamento para a recuperação de materiais.

Assim, conhecer o volume de REEE, gerado em uma determinada localidade, é um primeiro e importante indicador para o gerenciamento dessa categoria de resíduos. No entanto o conhecimento de especificidades sobre os resíduos pode viabilizar ações mais efetivas, como a consolidação de parques de indústrias recicladoras adequadas às tipologias de resíduos gerados ou aptos à incorporação de matérias-primas secundárias recuperadas, a partir do processamento dos equipamentos eletroeletrônicos pós-consumo.

Outro ponto relevante, identificado por Araujo *et al* (2020), diz respeito à localização dos pontos de entrega voluntária (PEVs), que podem viabilizar a coleta dos REEE por meio da participação ativa dos consumidores. A localização e gerenciamento dos PEVs é um aspecto que requer estudos direcionados, considerando-se outros indicadores como densidade populacional, padrão de consumo e IDH, por exemplo. Esse assunto é abordado nos Capítulos 5 e 7 deste livro.

Algumas ferramentas informatizadas têm sido aplicadas, no segmento de reciclagem, no sentido de viabilizar a gestão dos resíduos eletroeletrônicos. A maior parte dessas ferramentas são aplicações de contabilidade ambiental, balanço de massa, avaliação do ciclo de vida, fluxos logísticos e outros. Verifica-se porém uma tendência quanto ao desenvolvimento de aplicativos, para a prestação de serviços no segmento, a partir de dispositivos móveis, bem como na adequação de sistemas para o controle da produção com foco no gerenciamento de resíduos.

Desta forma, o presente capítulo tem como objetivo a identificação e avaliação de algumas ferramentas informatizadas, para a gestão de resíduos eletroeletrônicos desenvolvidas no Brasil e no exterior e aplicadas, para a gestão de resíduos, com potencial para o gerenciamento do segmento de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos.

10.2. Sistemas informatizados e a gestão de resíduos

Diante do aprimoramento das soluções tecnológicas, deparamo-nos com um paradoxo. Enquanto os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos representam a categoria que mais cresce, em todo o mundo, demandando soluções que possibilitem a destinação ambientalmente adequada desses resíduos (Awasthi *et al.*, 2018), os serviços e produtos tecnológicos produzidos também podem viabilizar soluções que permitam um gerenciamento inteligente desses resíduos. Um sistema que, em tese, tem potencial de se retroalimentar.

Barros *et al.* (2013) enfatizam a ampliação da vantagem competitiva, a partir da redução dos custos e do impacto ambiental, decorrente da implantação de sistemas de logística reversa. O desenvolvimento de sistemas informatizados ainda é incentivado por órgãos ambientais, como é o caso de orientação do órgão ambiental Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), que sugere a criação de sistemas informatizados para a emissão de comprovantes para o monitoramento dos fluxos dos sistemas de logística reversa (CETESB, 2011).

Cardoso *et al.* (2006) correlacionam o nível de tecnologia dos produtos com seu tempo de vida útil. Também é possível afirmar que muitos produtos são descartados, antes mesmo do fim de sua utilidade, por surgirem itens similares com novos padrões e tecnologias, gerando assim um alto volume de resíduos que podem ser descartados de forma incorreta. Conforme mostra a Figura 1, é possível observar a relação do tempo com o nível de evolução tecnológica dos produtos.



Figura 1 - Potencial tecnológico e Ciclo de Vida do produto

Fonte: Adaptado a partir de Cardoso et al. (2006).

Após analisar a Figura 1 e constatando que há um grande volume de resíduos sendo gerados, sem mesmo os produtos terem chegado ao fim de sua utilização, é preciso uma gestão eficiente, a qual demanda uma carga de trabalho elevada. A utilização de ferramentas que apoiem esse gerenciamento de empresas recicladoras se faz necessário.

Xavier *et al.* (2006) apontam ferramentas que fundamentam o funcionamento e ações, para a tomada de decisão, no segmento da gestão ambiental, segundo o conceito de Sistemas de Suporte à Decisão Ambiental (do inglês, *Environmental Decision Support Systems* – EDSS). Esses autores identificaram que as ferramentas informatizadas utilizadas tinham como base critérios de análise da informação baseada nos seguintes parâmetros:

- a) Análise do Ciclo de Vida: característica fundamental da maioria dos sistemas. Essa análise pode anteceder a entrada de dados ou ser realizada a partir de uma ampla entrada de dados no sistema;
- b) Aspectos e Impactos: levantamento e análises dos aspectos e impactos ambientais associados;
- c) Normas e legislação: os sistemas mais recentes passaram a incorporar em sua arquitetura a inserção de critérios exigidos pelos instrumentos legais e normativos;
- d) Levantamento de alternativas e possibilidades: os sistemas mais complexos, que incorporam o conceito de inteligência artificial, incorporam a possibilidade de realização de análise de alternativas e opção por rotas de decisão com maior grau de confiabilidade;

e) Estudo de viabilidade: de forma mais completa e utilizando ferramentas multicritério e/ou multiobjetivo, para a análise de viabilidade, os sistemas atuais possibilitam a agregação de conceitos de valoração e contabilidade ambiental na análise de viabilidade.

Os aspectos legais e normativos, bem como o potencial de reaproveitamento de peças, partes, componentes e materiais, têm motivado o desenvolvimento de sistemas logísticos para a destinação de REEE. Tais sistemas podem ou não possuir algum grau de informatização e, desta forma, possibilitar o atendimento de requisitos como, por exemplo: adequação às exigências legais, rastreabilidade, potencial de reciclabilidade e nível de maturidade. Poucos sistemas logísticos possuem informatização customizada para os critérios específicos de logística reversa ou gerenciamento de REEE. Verifica-se que, na maior parte dos casos, há a adaptação de sistemas utilizados para o gerenciamento da produção ou dos sistemas de controle. Diversos autores já enfatizaram a carência de sistemas informatizados dedicados ao gerenciamento dos canais da logística reversa no Brasil (Mueller, 2005; Daher et al., 2006; Shibao et al., 2010; Barros et al., 2013).

Desse modo, é possível se estabelecer que o setor de gestão de REEE e a logística reversa, em um escopo mais amplo, são indissociáveis. A gestão de REEE atua diretamente com todas as empresas fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes de eletroeletrônicos e assume a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto, exigindo uma adaptação das propostas de gerenciamento de fluxos já existentes aos requisitos da logística reversa. Nesse contexto, a aplicação de *softwares*, para a tomada de decisão, em pequenas e médias empresas, para que funcionem com os REEE e estejam alinhados com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

A Lei de nº 12.305 de 2010 estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos e aplica o cumprimento rigoroso por parte de pessoas jurídicas e pessoas físicas, além de deixar claro sobre a responsabilidade compartilhada entre setores públicos e privados no ciclo de vida dos produtos. Neste sentido, Xavier *et al.* (2020) apontam que as ferramentas que fundamentam o funcionamento e ações das empresas que atuam nesse segmento no Brasil devem considerar a implantação de sistemas para logística reversa voltados às necessidades específicas. Da mesma forma, Lira (2018) aponta que as organizações procuram estratégias mais baratas para seus ciclos de produção e que sejam eficientes sem infringir as regulamentações ambientais e sem deixar de lado os ganhos econômicos. Um equilíbrio difícil de estabelecer, porém necessário.

Quando um sistema é desenvolvido, para atender um nicho específico de mercado, deve ser desenvolvido a partir de etapas pré-estabelecidas. Os requisitos são identificados, em conjunto com a fonte da demanda, o sistema é desenvolvido, a partir de ferramenta própria (linguagem de programação, infraestrutura, banco de dados compatível, entre outros requisitos), segue-se com protocolo de testes e correções. Desta forma, o encadeamento de ações segue parâmetros especificados pela metodologia de desenvolvimento, bem como, a partir de critérios estabelecidos por empresas que já vivenciaram problemas e manobram soluções, para vencer os entraves da gestão de resíduos sólidos. Por isso, os *softwares* direcionados, para a gestão de REEE, tendem a apresentar soluções específicas para atender as demandas identificadas de modo eficiente. No Brasil, a partir de iniciativa do Ministério do Meio Ambiente (MMA), foi estabelecida uma importante ferramenta, para apoiar estados, municípios e a União, que serve como exemplo nesse contexto, o Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos (SINIR). Outras iniciativas encontram-se em desenvolvimento, mas a maior parte das soluções informatizadas, para a gestão ambiental de resíduos, consiste na adaptação

de sistemas já implementados para a gestão de processos administrativos e operacionais (Xavier *et al.*, 2006).

10.2.1. O sistema nacional de informações sobre resíduos (SINIR)

Os resíduos eletroeletrônicos, antes sem incentivo ao reaproveitamento, hoje são destinados, por meio de soluções orientadas pelo conceito da economia circular que prioriza o retorno de equipamentos descartados, após apresentarem defeitos ou ao chegarem ao final de sua vida útil, possibilitando a recuperação de peças, partes ou componentes ao prolongamento da vida útil ou a recuperação de matéria-prima para que seja minimizada a exploração de recursos naturais.

É assim, basicamente, que funcionam as empresas que atuam no segmento da reciclagem. Apesar de intuitivo, os processos não são simples. De fato, é uma logística bastante complexa e de alto custo ainda e, por essa razão, a gestão de resíduos eletroeletrônicos precisa de ferramentas de apoio que facilitem e ajudem as empresas nesse segmento, visando tornar o Brasil referência em sistemas circulares. Nesse sentido, a primeira iniciativa governamental foi a elaboração do Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SINIS), estabelecido, a partir da Lei nº 11.445 de 2007, que instituiu a Política Nacional de Saneamento Básico. Esse sistema de dados é alimentado, com base na iniciativa de municípios brasileiros com informações sobre saneamento e gestão de resíduos. No entanto, ainda, tem pouca representatividade entre a totalidade dos municípios e há alguma inconsistência, em parte, ocasionada pela alternância de governos e reconhecimento da responsabilidade pela coleta de dados. A principal vantagem das informações do SINIS é a consolidação de uma base histórica.

Mais recentemente, foi proposto um novo sistema, o Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR⁵). Esse é um exemplo de ferramenta, a qual integra informações desde a esfera municipal até a esfera da união, com o intuito de informar ao cidadão e a qualquer parte interessada sobre o histórico da coleta seletiva em cada região, bem como suas exigências, na hora de coletar os resíduos eletrônicos e o alcance da coleta seletiva. Há também dados técnicos e de saúde como as áreas contaminadas por disposição inadequada de lixões, assim como as metas que cada esfera pretende atingir e em qual status essas metas encontram-se para serem classificadas como concluídas ou em atraso. O SINIR é uma ferramenta grandiosa que é consultada para tomada de decisão do legislativo e de outras empresas governamentais e privadas que têm ligação direta ou indiretamente com a coleta seletiva e mineração urbana, conforme o próprio website do SINIR. O sistema opera em dois módulos, o municipal e o estadual e contempla informações e funcionalidades conforme detalhado a seguir.

Módulo Municipal:

- A existência, a abrangência e as metas associadas à coleta seletiva;
- A necessidade de arranjos de municípios com problemas comuns para ganho de escala e compartilhamento de soluções por meio de consórcios públicos de resíduos entre outras informações;
- A identificação de áreas contaminadas por disposição inadequada (lixões) e de áreas favoráveis para a disposição final ambientalmente adequada.

⁵ URL: <https://sinir.gov.br/>

Módulo Estadual:

- Metas para a eliminação e recuperação das áreas identificadas pelos seus municípios (lixões);
- Metas para o aproveitamento energético de gases gerados nos aterros sanitários;
- Estudos, medidas e incentivos para a gestão regionalizada de resíduos sólidos: incentivo à formação de consórcios públicos de resíduos sólidos.

O SINIR, que se encontra disponível, desde 2018, reforça que o sistema de informação, que compõe a sua estrutura digital, foi desenvolvido seguindo regulamentações e parâmetros contidos na Lei nº 12.305 de 2010. Com isso, os Estados, Municípios e a União podem utilizar para embasar a tomada de decisão. A partir dos resultados e análises da informação, gerados por esse *software*, é possível elaborar projetos para eventos futuros, assim como revisar decisões passadas. Vale ressaltar que o software do SINIR é ininterrupto, quando se fala de coleta e tratamento das informações estratégicas, o que afirma a confiabilidade para a sua utilização como um grande apoio na tomada de decisão.

Outras ferramentas que são apresentadas, a seguir, também fazem parte do conjunto de tecnologias que podem contribuir ao apoio e à gestão de empresas que trabalham com logística reversa e que, como outras categorias de empreendimento procuram com a ajuda da tecnologia melhorar a gestão e a coleta dos resíduos eletrônicos no Brasil e no mundo.

10.3. Identificação e análise de sistemas para a gestão de resíduos

Com o objetivo de identificar e analisar algumas iniciativas de sistemas informatizados desenvolvidos para a gestão de resíduos, foram realizadas pesquisas em *websites* de busca, a partir de palavras-chave que possibilitaram identificar sistemas específicos para o segmento e, em especial, a atuação na gestão de REEE. Assim, esta pesquisa aborda aspectos relevantes para se poder compreender como as ferramentas tecnológicas, para o apoio à tomada de decisão, podem contribuir para a gestão de uma organização, sua consolidação no mercado e a alavancagem de vendas, por estratégias voltadas para o atendimento dos desejos e necessidades dos clientes, como meio de se manter no mercado competitivo.

Para a realização da pesquisa, foram analisados os *websites* das empresas apresentadas na Tabela 1. Essas empresas foram classificadas como empresa para fornecimento de *software* com a finalidade de gerenciar ou empresa que presta serviços na área de reciclagem de resíduos eletroeletrônicos. Foram levados em consideração o histórico da empresa e os serviços prestados por cada uma dessas organizações mensuradas na pesquisa. Para chegar até esses websites que compõem a pesquisa, foram utilizadas os buscadores: Google, Bing e Google Academy, com filtros de palavras-chaves como: resíduos eletroeletrônicos, coleta e sistema (do inglês, *E-waste, collection, take-back e system*). O propósito seria identificar sistemas que atuam na gestão de resíduos e, em especial, na gestão de REEE. Como critério para a busca, considerou-se a disponibilidade em língua inglesa ou português e, ainda, a acessibilidade das informações a partir das palavras-chave pré-definidas.

10.3.1. Sistemas informatizados em plataforma Web

Foram analisados 15 sistemas disponibilizados na internet, dos quais sete foram elaborados por empresas privadas e oito por empresas públicas. Apenas dois sistemas, o Think Circular e o SINIR são iniciativas nacionais. A abrangência de atuação, a partir do sistema, tende a considerar a localização geográfica da empresa. Com o objetivo de testar o desempenho dos sistemas acessíveis, foram realizados cadastros com endereços no Brasil e nenhuma das empresas, nas quais foi possível realizar o teste, permitiam a inclusão de endereço, para além da área de localização, o que pode ser caracterizado como uma importante limitação do sistema de gerenciamento de resíduos proposto.

Como critério de acessibilidade, considera-se a disponibilidade gratuita do sistema, em sua totalidade ou em parte, para fins de avaliações mais detalhadas.

Na Tabela 1 são apresentadas as características de sistemas para a gestão de REEE a partir de empresas que prestam serviços em todo o processo ou em parte do ciclo dos produtos pós-consumo.

Apesar de alguns dos sistemas especificarem a possibilidade de processamento de REEE, em nenhuma das fontes pesquisadas se encontram especificadas as categorias de resíduos eletroeletrônicos que são consideradas no sistema.

Tabela 1. Características de sistemas informatizados para a gestão de resíduos em plataforma Web (GARCIAS NETO, 2021).

	Sensible Recycling	Clean Earth inc	STS Electronic Recycling	HOBİ	Los Angeles Count	Household E-Waste	WM Lampracker	National Environment Agency	Sustainabilit y Victoria	ERP UK	Cal Recycle	eWaste	DTSC	Think circular	SINIR
Tipo de empresa	Privada	Privada	Privada	Privada	Pública	Pública	Privada	Pública	Pública	Pública	Pública	Privada	Pública	Privada	Pública
Específico para REEE												Sim	Sim	Não	Não
Atende demanda	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada	Pública	Privada	Privada	Privada	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada	Privada e Pública
Dados abertos ou restritos	Restritos	Restritos	Restritos	Restritos	Restritos	Restritos	Restritos	Restritos	Abertos	Restritos	Abertos	Restritos	Restritos	Restritos	Abertos
Tipo de licença	NES	LIA							LIA	LIA	LIA	LIA		-	-
Segue alguma norma específica	BBB	RCRA TSDFs	HIPAA e EPA	ISRI IAITAM ILRA STAR			Stewards@R2	RSA	IWMPs WMPs			NA	CCR	PNRS	PNRS
País de origem	US	US	US	US	US	MY	US	SY	AU	UK	US	NO	US	BR	BR
Área de abrangência	Flórida	US, CA, MX e PR		Arizona, Illinois e Texas			Minneapolis	Singapura	Vitoria		Califórnia	Nórdicos, Bálticos, África / Ásia	Califórnia	Brasil	Brasil
Há taxa de coleta	Não	Sim	Sim				Sim	Não	Sim	Sim		NA	Sim	NA	NA
Sistema acessível	Não	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Não	Sim	Sim		Sim		Não	Sim

● NA – não se aplica.

10.3.2. Sistemas informatizados para dispositivos móveis

A profusão de aplicativos disponibilizados para os usuários também permite a gestão destão de resíduos sólidos. Diversos países possuem sistemas desenvolvidos para dispositivos móveis e buscam contribuir para um gerenciamento efetivo e rastreável. No entanto, poucas soluções apresentam o potencial de atender as recentes demandas dos requisitos legais.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelece a divulgação de informações por parte dos agentes corresponsáveis na cadeia produtiva e a gestão a partir de sistemas informatizados pode cumprir essa função.

A Tabela 2 apresenta a análise de sistemas exclusivamente desenvolvidos para dispositivos móveis, ou seja, aplicativos. Todos os sistemas analisados oferecem serviços de coleta seletiva de resíduos, sendo alguns exclusivos para REEE, bem como empresas que têm como serviço *softwares* para auxiliar outras organizações e pessoas com a coleta seletiva.

Internacionalmente verifica-se um número significativo de aplicativos disponíveis e exclusivos para a gestão de REEE. No Brasil, no entanto os aplicativos ainda contemplam a diversidade de resíduos e, mais especificamente, os resíduos recicláveis. Apesar de existir aplicativos nacionais, não se verifica um potencial, para o gerenciamento de dados sobre a geração de REEE de forma mais precisa. Foram considerados na análise seis aplicativos, dos quais três são brasileiros. O número de *downloads* identificado na Tabela 2 tem como base o número da Play Store (plataforma Android).

Após analisar as tabelas, é possível identificar que, entre os países pesquisados, os Estados Unidos se destacam na quantidade de serviços oferecidos para a recuperação de descartes de REEE. Percebe-se uma oferta de recepção, captação e transporte gratuito entre os incentivos. Existem softwares online que permitem agendar as coletas com datas e horários à escolha de quem está descartando os REEEs.

A partir da análise dos sistemas relacionados, verifica-se que o sistema Sensible Recycling e a Clean Earth não são desenvolvedoras ou locatárias de softwares e, sim, prestadoras de serviço para a coleta e reciclagem de REEE. Sendo assim, o objeto de estudo deste capítulo passa a se dirigir com referência a essas análises realizadas e aplicadas.

É possível ainda destacar que os aplicativos ECS e-Wast, e-coleta – Ecotres e Descarte Rápido (Tabela 2) se destacam por terem, somados, mais de onze mil downloads. Ainda se nota que os aplicativos que mais se destacam em números de downloads são aqueles que oferecem os serviços de coleta de forma gratuita e que os dados podem ser consultados de forma rápida e fácil, apenas com o download do aplicativo.

Tabela 2. Características de sistemas informatizados para a gestão de resíduos em sistemas para dispositivos móveis.

	ECS e-Waste	E-waste management	E-coleta - Ecotres	Meu Resíduo Logística	Descarte Rápido	Resíduo App
Tipo de empresa	Privada	Pública	Privada	Privada	Pública	Pública
Atende demanda de gestão privada ou pública	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada e Pública	Privada	Privada	Privada e Pública
Dados abertos ou restritos	Restritos	Abertos	Abertos	Restritos	Abertos	Abertos
Tipo de licença	LAP	LSL	LSL	LUT	LUT	LUT
Número de downloads (Base Android - via Play Store)	+5.000	+50	+1.000	+1.000	+5.000	+5
Segue alguma norma específica	ISO 9001, ISO 14001, and OHSAS 18001	RCRA TSDFs				
País de origem	IN	IN	BR	BR	BR	PE
Área de abrangência	PAN Índia	Powai, Mumbai, Índia	Algumas cidades de Minas Gerais	--	Todo o Brasil	Iquitos
Considera importação/exportação	Não	Não	Não	Não	Não	Não
Há taxa de coleta	Sim	Não	Não	Sim	Não	Não
Sistema com cadastro gratuito	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Fonte: Adaptado de GARCIAS NETO, 2021.

Legenda para Tipos de licença de software:

LAP - Licença para aquisição perpétua

LUT - Licença para uso temporário

LSL - Licença para software livre

LOS - Licença Open Source

LIA - Licença para aluguel

LSA - Licença para SaaS (Software como Serviço)

Existe outra informação que se destaca entre os aplicativos com mais *downloads*. Esses ajudam o usuário com os horários de coleta e na separação dos materiais de forma a saber se são resíduos sólidos, se são do tipo 1 (classificação para descartes perigosos) ou se são eletrônicos como celulares, impressoras, televisões ou lâmpadas. É comum observar que nem todos os locais estão preparados para oferecer a coleta seletiva e é comum que os aplicativos citados funcionem em estados e/ou até cidades restritas.

A maior parte dos sistemas não é dedicada à gestão de REEE, mas atende demandas diferenciadas da cadeia de logística reversa para a gestão de resíduos. Ao longo da realização desta pesquisa, foram encontradas limitações como o acesso limitado a alguns aplicativos e ferramentas. Isso impossibilitou algumas análises por meio dos históricos e informações contidas nos *websites* dos desenvolvedores.

Em estudos futuros, podem ser realizadas análises mais detalhadas dos aplicativos e ferramentas existentes, a fim de classificá-las pela heurística de usabilidade baseada em Nielsen (1994), como também análise mais detalhada se os aplicativos e ferramentas ajudam nos quesitos da logística reversa de eletroeletrônicos.

10.4. Conclusões

A partir da pesquisa, foram encontrados alguns tipos de serviços prestados por recicladoras de REEE, como: coleta gratuita, descaracterização de marcas, coleta seletiva e até a formatação de *hard disks* (destruição de dados) antes da reciclagem. Apesar disso, nesse segmento, ainda há poucos recursos informatizados que viabilizem desde a estruturação das cadeias de suprimentos até o auxílio ao processo decisório.

Diante do exposto, fica evidente a demanda por ferramentas que ajudem na tomada de decisão de instituições que trabalham com logística reversa em REEE. Portanto, como proposta futura, o desenvolvimento de uma ferramenta que aplique os conceitos levantados neste estudo se faz necessário. Dessa forma, possibilita que empresas de tecnologia da informação possam se focar para produzir *softwares* como serviço ao nicho de mercado de coleta seletiva da REEE.

No Brasil, a logística reserva já deveria ser parte de todas as empresas fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes de eletroeletrônicos, que assumem a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto. Percebe-se, no Brasil, então, uma oportunidade, para a criação e desenvolvimento de *softwares*, para a tomada de decisão, em pequenas e médias empresas, para que funcionem com as REEEs e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que foi instituída pela Lei Federal nº 12.305 e, posteriormente, regulamentada pelo Decreto nº 7.404/2010.

É importante ressaltar que não se teve acesso a todas as partes que compõem alguns dos sistemas apresentados, portanto não podemos afirmar que são *softwares* que possam ajudar na tomada de decisão. Contudo, quando o quesito são empresas que desenvolvem sistemas para

auxiliar a tomada de decisão de recicladoras de REEE, os resultados são poucos. Isso permite entender que existem poucos softwares especializados, em gestão de resíduos eletroeletrônicos, ou seja, há espaço para o desenvolvimento de sistemas alinhados com os requisitos legais e demandas de mercado.

Referências

ARAUJO, Raissa André de; XAVIER, Lúcia Helena da Silva Maciel. Banco de dados e estudo geoespacial de organizações do segmento de resíduos eletroeletrônicos no Brasil. 2019.

BARROS, Conceição Aparecida Pereira et al. A contribuição da logística reversa para redução dos custos e do impacto ambiental. *Ciências Gerenciais em Foco*, v. 4, n. 1, 2013.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 02 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília, DF, fevereiro, 1998.

CARDOSO, R.; ADISSI, P. J.; XAVIER, L. H.. Ciclo da vida do produto, tecnologia e sustentabilidade: breve análise da gestão ambiental de Resíduos Sólidos no Brasil. *Anais do XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção*. Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2007.

CERVO, Amado L. e BERVIAN, Pedro A. (1983) *Metodologia Científica : para uso dos estudantes universitários*. 3.ed. São Paulo : McGraw-Hill do Brasil.

CETESB. Orientações | Logística Reversa. CETESB, 2015. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/logisticareversa/orientacoes/>. Acesso em: 4 de janeiro de 2021.

DAHER, Cecílio Elias; SILVA, Edwin Pinto de La Sota; FONSECA, Adelaida Pallavicini. *Logística reversa: oportunidade para redução de custos através do gerenciamento da cadeia integrada de valor*. 2006.

GARCIAS NETO, J.C. SIS-DATARE: Ferramenta para Apoio à Decisão na Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos. *Dissertação de Mestrado*. Cesar School. (2021).

MUELLER, Carla Fernanda. *Logística Reversa, Meio Ambiente e Produtividade*. Grupo de Estudos Logísticos, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

NIELSEN, J. (1994, April). Usability inspection methods. In *Conference companion on Human factors in computing systems* (pp. 413-414).

SHIBAO, Fábio Ytoshi; MOORI, Roberto Giro; SANTOS, MR dos. A logística reversa e a sustentabilidade empresarial. *Seminários em administração*, v. 13, 2010.

SINIR. SINIR - Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos. SINIR, 2018. Disponível em: <https://sinir.gov.br/index.php/component/content/article/2->

[uncategorised/117-sistema-nacional-de-informacoes-sobre-a-gestao-dos-residuos-solidos-sinir](#). Acesso em: 4 de janeiro de 2021.

XAVIER, L.H., OTTONI, M. S.O., ARAUJO, R.A., CUGULA, J.S., CONTADOR, L., PETRUNGARO, G.N., ABREU, L. P. P., SANTOS, L.A., REBELLO, R.Z., GOMES, C.F., SIERPE, R., MANÇANO, M.R., CARDOSO, E.R., ROMAY, K.V.M., SUEMITSU, W., CALDAS, M.B. Manual de destinação de resíduos eletroeletrônicos. Orientações à sociedade sobre como dispor adequadamente os resíduos eletroeletrônicos no estado do Rio de Janeiro. 3ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2020.

XAVIER, L.H., CARDOSO, R., XAVIER, V.A., 2006. Sistemas informatizados como ferramenta para o monitoramento e a gestão ambiental. XXVI ENEGEP. Fortaleza, CE. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Lucia-Helena-Xavier/publication/326274879_Sistemas_informatizados_como_ferramenta_para_o_monitoramento_e_a_gestao_ambiental/links/5b43f980458515f71cb88f3f/Sistemas-informatizados-como-ferramenta-para-o-monitoramento-e-a-gestao-ambiental.pdf. Acesso em março de 2021.



CAPÍTULO 11

MATERIAIS CRÍTICOS E A GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

Leonardo Picanço Peixoto de Abreu

Graduando em Engenharia de Materiais pela UFRJ
Bolsista do projeto DATARE - CETEM/MCTI

Rafaela Zamprogno Rebello

Engenheira Ambiental pela UFES
Mestranda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais
pela COPPE/UFRJ
Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ
Mestre e Doutora em Engenharia de
Produção pela COPPE/UFRJ
Pesquisadora Titular CETEM/MCTI

11.1. Introdução

O Brasil é historicamente conhecido como exportador de commodities⁶, condição que possibilitou o aprimoramento das atividades de extração e comercialização de matérias-primas ou recursos naturais, mas gerou a especialização produtiva em bens primários e impactou o desenvolvimento social e econômico do país (COELHO, 2016). A diversidade e concentração de diferentes recursos naturais incentivou o amadurecimento da mineração extrativa fundamentada em áreas com vocação mineral e, conseqüentemente, fomentou os respectivos arranjos produtivos locais. Todavia as indústrias produtoras nacionais consomem uma pequena parcela dos recursos minerais disponíveis que, em sua maior parte, são exportados. Entre os principais produtos de origem mineral exportados estão: minério de ferro (66%), ouro (14%), cobre (7%) e ferronióbio (6%) (IBRAM, 2020).

Em janeiro de 2020, o valor da tonelada de minério de ferro, comercializado a US\$ 78,00, em fevereiro de 2019, atingiu US\$ 170,00 (COMEX, 2021). Valorização explicada pela redução da oferta e aumento da demanda dessa commodity a partir da pandemia. Se por um lado o aumento do preço favorece as exportações do Brasil, por outro lado, pressiona outras nações a buscar fontes alternativas de extração do recurso. No caso específico do minério de ferro, pode-se afirmar que é um minério empregado, na manufatura de equipamentos de menor potencial tecnológico e, ainda, para conferir estrutura ou resistência em produtos e, por isso, é demandado em grandes quantidades por unidade de produto, diferentes de produtos com alto potencial tecnológico que, com o passar do tempo, têm tamanho e peso reduzidos e com maior eficiência.

Minerais como potássio, rocha fosfática e enxofre, demandados em larga escala como matéria-prima para fertilizantes, são importados em razão da escassez de reservas naturais no país. Em 2018, as importações desses três minerais somaram mais de US\$ 2,7 bilhões, mais que um terço das importações minerais do país (Brasil Mineral, 2018), ressaltando a importância estratégica desses insumos quanto à produção agrícola. Por outro lado, o país possui reservas estratégicas de minerais com potencial para a indústria de alta tecnologia (IBRAM, 2019).

O nióbio, por sua vez, é um mineral de importância estratégica para indústrias produtoras com alto potencial tecnológico e maior parte desse minério é exportado. O ferronióbio (FeNb) atingiu, no primeiro trimestre de 2020, um volume de exportação equivalente a US\$ 425 milhões, contra US\$ 4,6 bilhões para o minério de ferro (IBRAM, 2020). As reservas nacionais de nióbio equivalem a 95% de toda a reserva mundial, o que qualifica o nióbio como material crítico para as nações que demandam esse insumo. Minerais de terras raras, ou simplesmente terras raras, são compostos por 17 elementos químicos e são amplamente utilizados em produtos de tecnologia de ponta e estão associados à exploração de tântalo, titânio e nióbio.

⁶ determinado bem ou produto de origem primária, com grande valor comercial e estratégico, produzidos em larga escala e comercializado, em nível mundial e, por isso, têm preços definidos pelo mercado internacional. Geralmente, trata-se de recursos minerais ou agrícolas.

11.2. Materiais críticos

A demanda por técnicas e materiais empregados na construção, comunicação e informação tem como objetivo proporcionar bem-estar à sociedade por meio de soluções que aumentem a qualidade de vida. Com o aprimoramento das técnicas de extração de recursos naturais e produção aumentou consideravelmente o consumo a partir de uma maior disponibilidade de volume e diversidade de produtos. Assim, ao final da vida útil, uma variedade maior de produtos e materiais necessita ser direcionada, para formas específicas de destinação, de modo a evitar impactos ou possibilitar a recuperação e reinserção em cadeias produtivas, por meios de modelos de negócio baseados, por exemplo, no conceito de economia circular.

Novos cenários revelam que a fonte de recursos como insumos para os diversos processos produtivos nem sempre será a natureza. A demanda de recursos pode ser significativamente reduzida, por meio do reúso, recondicionamento e manutenção de produtos, da mesma forma que a exploração pode se dar de forma alternativa, a partir de materiais residuais, recuperando-se matéria-prima secundária. Desta forma, futuras tecnologias podem demandar matérias-primas em maior escala ou diversidade e a fonte pode compensar o impacto gerado pela demanda. Tal questão depende de sua disponibilidade, considerando-se aspectos de disponibilidade natural, disponibilidade em materiais residuais e ainda a geopolítica.

Determinado material, ou matéria-prima, é considerado crítico para um determinado país quando apresenta significativa importância econômica e risco de não atender a demanda interna (JRC, 2020). A importância econômica pode ser definida, com base nos seguintes critérios: (i) o quanto determinado material está inserido na cadeia de suprimentos; (ii) sua relevância no fomento a tecnologias avançadas, e (iii) seu potencial de sustentabilidade. As matérias-primas críticas, ou, simplesmente, materiais críticos, são essenciais à promoção de novas tecnologias em áreas, como fonte de energias renováveis (painéis solares), mobilidade elétrica (carros elétricos) e setor de defesa (drones), conforme proposto na Figura 1.

Na Figura 1, é mostrado o risco de fornecimento associado às matérias-primas e como essas estão relacionadas com as tecnologias habilitadoras⁷ (Baterias, Células de combustível, Motores, Energia Eólica, Painéis Solares, Robótica, Drones, Impressão 3D e Tecnologia de Informação e Comunicação). Em drones, robótica e tecnologia de informação e comunicação, há a presença de um amplo espectro de matérias-primas, contudo o alto risco associado às terras-raras leves e pesadas (ETRLs e ETRPs), presentes também nas tecnologias de células de combustível e energia eólica, alerta para possíveis entraves aos seus desenvolvimentos.

O risco de não suprir a demanda interna ao desenvolvimento tecnológico pode ser atribuído, entre outros fatores, à concentração de matérias-primas, em países que exibam alguns

⁷ Tecnologias que capacitem indústrias e/ou usuários para atuarem no contexto da indústria 4.0 e desenvolvimento sustentável e fomentem a criação de serviços e produtos inovadores.

problemas característicos, como a má governança e a alta dependência de importações. Esse risco pode ser mitigado a partir da realização de análises da viabilidade da reciclagem ou substituição de determinada matéria-prima (EUROPEAN COMMISSION SCIENCE HUB, s.d.)

A definição de minerais de conflito emerge de questões socioeconômicas e tem grande interface com os riscos relacionados ao suprimento de demandas dos materiais. Um exemplo conhecido é a da exploração dos 3TG (Estanho, Tântalo, Tungstênio e Ouro), na República Democrática do Congo e países adjacentes, onde minas controladas ilegalmente desses minerais financiam a luta armada em seus territórios, perpetuando guerras, expandindo poderes paralelos e impondo à população local condições de violência e exploração. Medidas foram criadas para frear a exploração ilegal desses minérios. Na União Europeia, orientam agentes da cadeia de produção a exigir autocertificação de fornecedores de 3TG. Toda a problemática de exploração humana e transparência da origem desses minérios aumenta suas criticidades como matérias-primas (ACHILLES, s.d.)

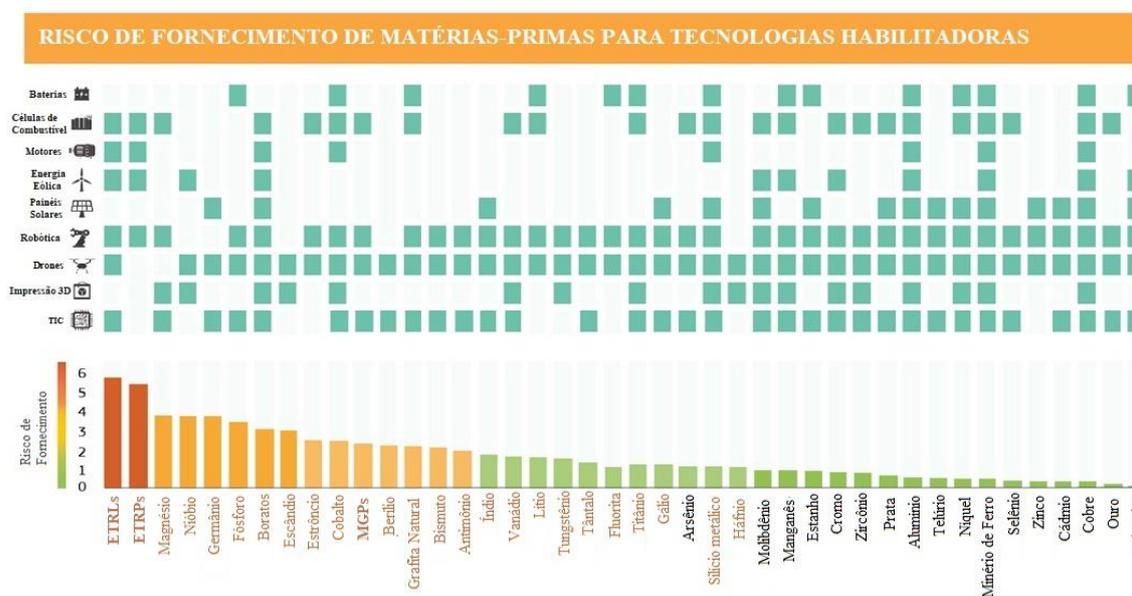


Figura 1. Risco de fornecimento de Matérias-Primas para Tecnologias Habilitadoras

Fonte: JRC (2020).

A União Europeia realiza, desde 2011, a avaliação trianual da criticidade de matérias-primas, tendo como foco o desenvolvimento tecnológico dos países membros. Essa avaliação resulta numa lista de materiais essenciais ao continente, em que é possível destacar alguns benefícios de tal avaliação (EUROPEAN COMMISSION, s.d.):

- Fortalecimento da competitividade entre indústrias nacionais;

- Estímulo para a produção de materiais críticos;
- Aumento da consciência de possíveis riscos ao não atendimento da demanda de materiais críticos;
- Promoção de acordos comerciais, fomento à pesquisa e desenvolvimento (P&D) e implementa agendas governamentais sustentáveis.

O Quadro 1 e a Figura 2 mostram as matérias-primas consideradas como críticas pela União Europeia em 2020.

Quadro 1. Lista dos 30 materiais críticos

Antimônio (Sb)	Fluorita (CaF ₂)	Magnésio (Mg)	Silício metálico (Si)
Barita	Gálio (Ga)	Grafita Natural	Tântalo (Ta)
Bauxita	Germânio (Ge)	Borracha Natural	Titânio (Ti)
Berílio (Be)	Háfnio (Hf)	Nióbio (Nb)	Vanádio (V)
Bismuto (Bi)	Terras-raras pesados	Grupo da Platina	Tungstênio (W)
Óxidos de Boro	Índio (In)	Fosforita	Estrôncio (Sr)
Cobalto (Co)	Lítio (Li)	Fósforo (P)	
Carvão coqueificável	Terras-raras leves	Escândio (Sc)	

Fonte: Adaptado de *European Commission* (2020).

Na Figura 2, a posição de cada matéria-prima é posicionada no gráfico mediante sua importância econômica e seu risco de fornecimento. Linhas vermelhas dividem o gráfico, em quatro quadrantes, com base em valores de base pré-estabelecidos. O primeiro quadrante é o que mostra as matérias-primas que ultrapassam esses dois valores de base, indicando as que são críticas.

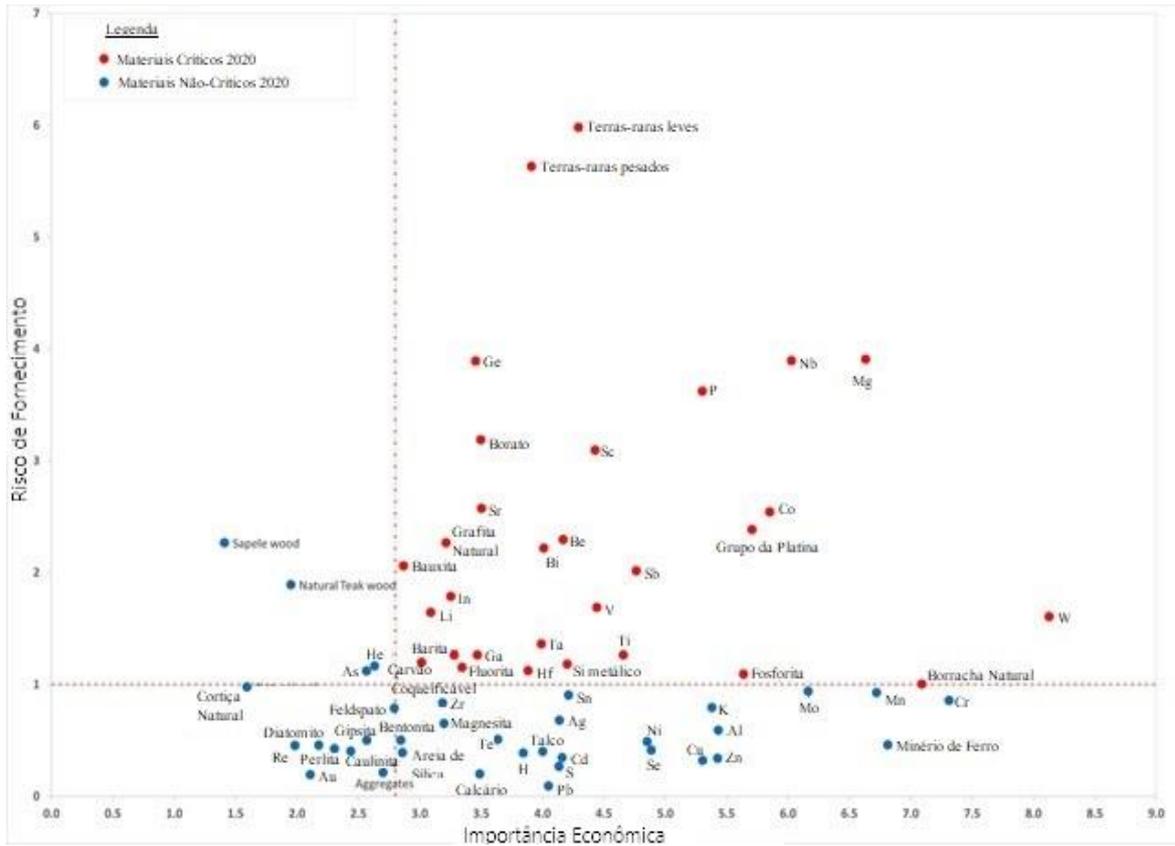


Figura 2. Gráfico de risco de fornecimento por importância econômica.

Fonte: Adaptado de JRC (2020).

De acordo com JRC (2020), os elementos de terras raras leves e pesados, nióbio, fósforo e magnésio, são exemplos de materiais críticos com alta importância econômica e alto risco quanto ao fornecimento. O equilíbrio entre a disponibilidade e a demanda de recursos tem reflexos para além da regulação econômica. Também reflete, por exemplo, o grau de circularidade dos sistemas produtivos, extrativos e de consumo.

Pesquisas, entretanto não parecem ter uma mesma direção quanto à determinação dessa criticidade, encontrando-se atualmente dificuldade para realizar esse tipo de avaliação. Alguns problemas para a determinação da criticidade de materiais, podem estar ligados à falta de disponibilidade de informações sobre materiais críticos, em outros níveis da cadeia de produção, que não o da mina. Além disso, avaliações diferentes com finalidades e escopos parecidos podem escolher indicadores distintos de criticidade sem englobar características reais de todo ciclo de vida do material (SCHRIJVERS *et al.*, 2020). Em outras áreas, a criticidade também pode possuir uma dimensão comercial, e abordagem da análise de estrutura de poder de companhias pode servir como uma avaliação complementar (LAPKO & TRUCCO, 2018).

Uma questão relevante é a de como os materiais críticos são percebidos por outras áreas, para viabilizar o cuidado com sua criticidade. Demonstra-se que o assunto ainda permanece

predominantemente dentro da temática ambiental e carece de visualização e atenção de outras áreas da engenharia, como, por exemplo, a ciência dos materiais, que é uma das precursoras de inovações tecnológicas (HOFMANN *et al.*, 2018).

Uma seleção de materiais eficientes pode contribuir à melhor performance, prever substituições e adotar medidas ambientais benéficas, como a reciclagem, por exemplo. No contexto dos materiais críticos, sua criticidade pode ser atenuada tendo em vista primeiramente essa seleção na fabricação de um produto (FERRO & BONOLLO, 2019; 2020)

Economia Circular é uma das formas de adequação que nosso sistema de produção pode implementar a fim de ser autossustentável. Ela resulta num conjunto de ações e medidas que visam ao reaproveitamento de cada item produzido, em uma fábrica, sendo de natureza biológica ou não e destinado até o usuário final. Por exemplo, a abordagem de categorizar por produto magnetos de NdFeB permite saber que decisões podem ser tomadas, para recuperar elementos de terras-raras desses magnetos, em resíduos eletroeletrônicos, ou saber que magnetos de NdFeB de turbinas de geradores eólicos são mais bem aproveitados na modalidade de reuso (HABIB, 2019).

Tecnologias que utilizam Lítio podem atuar como substituições para baterias de carros elétricos e, em médio prazo, diminuir o uso de cobalto - metal que integra os materiais de conflito, que incentivam a violação dos direitos humanos na região da República Democrática do Congo (BALLINGER *et al.*, 2019).

O Quadro 2, adaptado de Pavel *et al.* (2016), apresenta algumas tecnologias habilitadoras com o resumo de materiais críticos presentes em determinados componentes e materiais substitutos.

Quadro 2. Materiais Críticos nos setores de energia eólica e veículos elétricos e principais vias de substituições na época.

Setor	Tecnologia/Componente	Materiais Críticos	Possíveis Substituições	Materiais Substitutos
Iluminação e Telas	Lâmpadas Fluorescentes e LEDs	Eu, Tb, Y, In, Ga, Ge	Substituição de lâmpadas fluorescentes pelas de LED e LED-orgânico.	Zn, Mg, compostos organometálicos.
Energia Eólica	Geradores síncronos de ímãs permanentes (GSIP) em turbinas eólicas	Nd, Pr, Dy, Tb	Turbinas tradicionais baseadas em motores de indução	Cu
Veículos Elétricos	Motores síncronos de ímãs permanentes (MSIP) em transmissões elétricas	Nd, Pr, Dy, Tb	Motores alternativos contendo pouco ou nenhum elemento de terras-raras	Cu, ferrita

Fonte: Adaptado de Pavel *et al.* (2016).

11.3. Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), conforme detalhado no Capítulo 12, podem ser classificados em diferentes tipologias, variando de 4 (ABDI, 2013), 6 (EUROPEAN UNION, 2012), 8 (XAVIER et al., 2020), 54 (EUROPEAN COMMISSION, 2017) a 250 categorias de código PRODCOM (Magalini et al., 2014). O grau de detalhamento empregado pode estar relacionado ao tipo de análise pretendida ou grau de exigência de instrumento regulamentador.

A destinação de resíduos é um tema complexo e que requer diferentes áreas de conhecimento. É dos temas inseridos nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS⁸), ao se priorizar a saúde e qualidade de vida, produção e consumo sustentáveis, mudanças climáticas, bem como geração de renda e erradicação da pobreza. Países e empresas de diversos segmentos têm adotado práticas sustentáveis e compatíveis com os ODS.

A destinação ambientalmente adequada de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) encontra seu espaço, à medida que novas tecnologias, indústrias e produtos se desenvolvem, por meio da aplicação da automação, inteligência artificial, dinamismo nas comunicações e se prepara para a Indústria 4.0.

Entre 50 milhões de toneladas de REEE, que foram geradas em 2019, estima-se que o Brasil foi responsável por pouco mais de 2 milhões, que equivalem a mais de 10 quilos por habitante por ano. Awasthi *et al* (2018) afirmam que os REEEs já são a categoria de resíduos que mais cresce em volume em todo o mundo. Essa geração exponencial de REEE, ano após ano, transmite uma taxa de obsolescência de igual proporção e faz com que a destinação adequada desses resíduos seja uma das maiores preocupações ambientais do século XXI (ADEOLA, 2018).

Os eletroeletrônicos possuem diversos elementos, entre os quais, alguns possuem alto valor econômico como terras-raras, ouro, prata, entre outros. Visto a variedade de metais encontrados nessa tipologia de resíduo, eles podem ser considerados fontes secundárias de matéria-prima (BIRLOAGA & VEGLIÒ, 2018), como em painéis LCD, em que é possível extrair terras-raras de magnetos de NdFeB (LIXANDRU *et al.*, 2017) e recuperar Índio (In) (AKCIL *et al.*, 2019). Mesmo assim, a maior parte dos processos de extração desses materiais de fontes secundárias sofre da falta de infraestrutura e *design* inteligente que viabilizem tais operações (CHARLES *et al.*, 2020).

Alguns dos elementos encontrados nos eletroeletrônicos são considerados críticos, portanto a reciclagem de REEEs é uma alternativa que visa diminuir o risco à demanda dessas matérias-primas (BIRLOAGA & VEGLIÒ, 2018). No Quadro 3, são apresentados alguns dos materiais críticos que estão contidos nos resíduos eletroeletrônicos.

⁸ Planos de ações propostas, em 2015, pela Organização das Nações Unidas (ONU), em conformidade com a Agenda 2030, visando ao desenvolvimento sustentável.

Quadro 3. Alguns materiais críticos encontrados em REEE

Tipo	Elementos
Metais	Antimônio (Sb), Cobalto (Co), Gálio (Ga), Magnésio (Mg), Nióbio (Nb), Tântalo (Ta), Tungstênio (W)
Metais Preciosos*	Ouro (Au), Prata (Ag)
Terras-Raras	Ítrio (Y), Neodímio (Nd)
Elementos do Grupo da Platina	Írídio (Ir), Rutênio (Ru), Paládio (Pd)

Fonte: Adaptado de Charles *et al.* (2020).

Cabe ressaltar que metais preciosos, ouro (Au) e prata (Ag), não são classificados como críticos pela Comissão Europeia, para a União Europeia, na lista divulgada em 2020, entretanto isso não quer dizer que esses metais não sejam críticos para outros países nessa mesma data.

Quadro 4. Alguns dos elementos encontrados em componentes de *Smartphones*

Componentes	Elementos	Aplicação
Tela	In, Sn, O	O funcionamento <i>touch screen</i> das telas é em razão de um filme (<i>película</i>) transparente de óxido de índio-estanho que conduz eletricidade
	Al, Si, O, K	O vidro das telas, na maioria dos celulares, é composto de uma mistura de alumina (Al ₂ O ₃) e sílica (SiO ₂). A presença de potássio na formulação aumenta a resistência do material.
Bateria	Li, Co, C, Al, O	A maioria dos smartphones utilizam baterias de Lítio, cujo eletrodo positivo é composto de óxido de cobalto-lítio e o eletrodo negativo de grafita (carbono). Algumas baterias substituem o Cobalto pelo Manganês. O encapsulamento da bateria é feito de alumínio.
Eletrônicos	Ta	Principal componente de microcapacitores
	Cu	Cabos
	Ag, Au	Principais metais de componentes microelétricos. (Ex: Contatos)

Fonte: COMPOUND INTEREST (2014).

Esses elementos estão presentes em componentes eletrônicos: o Gálio está em LEDs (diodos emissores de luz); Neodímio em magnetos de discos rígidos e alto-falantes de celulares; Nióbio pode ser encontrado em alguns capacitores e indutores. Paládio pode ser encontrado em ligas de

ouro de contatos e em soldas (CHARLES *et al.*, 2020). O Quadro 4 mostra alguns elementos que compõem certos componentes de *Smartphones*.

Os smartphones são ícones de equipamentos eletroeletrônicos com grande potencial de recuperação de materiais de grande valor agregado, mas nem sempre categorizados como críticos.

11.4. Reciclabilidade de materiais críticos em resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

Como os resíduos eletroeletrônicos são uma fonte potencial de elementos primordiais ao desenvolvimento de novas tecnologias, muito vem sendo estudado na direção de aprimoramento dos processos de reciclagem desses materiais. Fatores, como a viabilidade financeira, eficiência de processo (em porcentagem de metal recuperado) e a mitigação de impactos ambientais gerados, precisam ser estudados mais a fundo, a fim de tornar a reciclagem possível de acordo com os três pilares da sustentabilidade.

A reciclagem de REEEs é composta principalmente de etapas de desmantelamento do produto em peças constituintes, em seguida, há a trituração mecânica dessas partes e a separação por categorias. Por fim, nesse triturado, são utilizados métodos de extração de metais que podem ser hidro-, piro- ou biometalúrgicos (ASHIQ *et al.*, 2019). Todos apresentam vantagens, desvantagens e eficiências a julgar pelo elemento a ser recuperando, tipo de REEE e condições de reciclagem. No entanto, mesmo que abordagens híbridas, como métodos físicos e microbianos, possam ser uma alternativa promissora e eficaz, tanto no quesito ambiental como tecnológico, são escassos estudos que avaliem a combinação de métodos (AWASTHI & LI, 2017).

Estimou-se que, em 2020, o potencial de reciclagem das terras-raras de magnetos permanentes, fósforo de lâmpadas fluorescentes e baterias de hidretos de níquel metálico seja entre 19-35% do total de resíduos que contenham esses elementos (BINNEMANS *et al.*, 2015; RAMESHKUMAR *et al.*, 2019). Métodos matemáticos também podem ser uma ferramenta para ajudar a tomada de decisão na questão de recuperação de materiais críticos de resíduos eletroeletrônicos. No estudo realizado, Ga, In e Ge devem ser a preocupação de reciclagem da Europa nesses resíduos (GRIMES & MAGUIRE, 2020).

Em aparelhos celulares, a reciclagem ocorre principalmente em placas de circuito impresso (PCIs), sobretudo, para a obtenção de ouro e cobre, nas baterias, para lítio e cobalto e, nas telas, para a extração de índio (GU *et al.*, 2019). No Quadro 5, um esquema das faixas de reciclagem de alguns elementos presentes em *Smartphones* é mostrado.

Quadro 5. Faixa de reciclagem de alguns elementos encontrados em *Smartphones*

Faixa de Reciclagem	Elementos
<1%	In, Li, Y, La, Tb, Pr, Eu, Dy, Gd, Ta, Nd, As etc.
1-10%	Sb
>50%	Sn, Al, Cu, Ag, Au, Ni, Pb, Co

Fonte: COMPOUND INTEREST (2015).

A faixa de reciclagem dos materiais críticos reflete a viabilidade de reciclagem desses elementos, a título de exemplo, em smartphones. Enquanto os materiais que possuem alto potencial de reciclagem indicam alto potencial de circularidade na cadeia produtiva, o baixo potencial de reciclagem evidencia a baixa circularidade e pode indicar a necessidade de desenvolvimento de tecnologias para a substituição dessa matéria-prima.

11.5. Conclusões

Muito embora a criticidade seja uma classificação subjetiva, visto sua volatilidade em questão de metodologia e nacionalidade dos países interessados, é preciso atenção na gestão dos materiais críticos. Eles são estratégicos, para alavancar novas tecnologias, como os carros elétricos e implementar a produção de equipamentos de fontes de energias alternativas que não emitam gases efeito estufa, como painéis fotovoltaicos, por exemplo.

Os resíduos eletroeletrônicos, por sua vez, são potencial fonte desses materiais e, no futuro, com gestão e tecnologia adequadas, não só a questão econômica pode ser cuidada e gerenciada, mas a ambiental também. A economia circular, ainda, é um importante conceito na adequação de novas tecnologias à sua utilização. A seleção de materiais e o *design* eficientes de produtos são algumas das medidas ligadas às práticas da economia circular que podem atenuar a crescente demanda por esses materiais.

Referências

ABDI – Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2013. Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos. Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. Disponível em: http://www.abdi.com.br/Estudo/Logistica%20reversa%20de%20residuos_.pdf. Acesso em: 04. Fev. 2021

ACHILLES, sem data. O que são minerais de conflito? Disponível em: <https://www.achilles.com/pt-br/industry-insights/o-que-sao-minerais-de-conflito/>. Acesso em: 10 jan. 2021

AKCIL, A., AGCASULU, I., SWAIN, B., 2019. Valorization of waste LCD and recovery of critical raw material for circular economy: A review. *Resources, Conservation & Recycling* 149, 622-637. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.06.031>.

ASHIQ, A., KULKARNI, J., VITHANAGE, M., 2019 Hydrometallurgical Recovery of Metals from E-waste. *Electronic Waste Management And Treatment Technology*, 225-246. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-816190-6.00010-8>.

AWASTHI, A.K., LI, J., 2017. An overview of the potential of eco-friendly hybrid strategy for metal recycling from WEEE. *Resources, Conservation & Recycling* 126, 228-239. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.014>.

AWASTHI, A.K., WANG, M., AWASTHI, M.K., WANG, Z., LI, J., 2018. Environmental pollution and human body burden from improper recycling of e-waste in China: A short-review. *Environmental Pollution* 243, Part B, 1310-1316. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.037>.

BALLINGER, B., STRINGER, M., SCHMEDA-LOPEZ, D.R., KEFFORD, B., PARKINSON, B., GREIG, C., SMART, S., 2019. The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply. *Applied Energy* 255, 113844. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113844>.

BINNEMANS, K., JONES, P.T., BLANPAIN, B., GERVEN, T., YANG, Y., WALTON, A., BUCHERT, M., 2013. Recycling of rare earths: a critical review. *Journal of Cleaner Production* 51, 1-22. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>.

BRASIL MINERAL, 2018. Dependência externa contínua. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/depend%C3%Aancia-externa-continua>. Acesso em: 6 jan. 2021.

CHARLES, R.G., DOUGLAS, P., DOWLING, M., LIVERSAGE, G., DAVIES, M.L., 2020. Towards Increased Recovery of Critical Raw Materials from WEEE- evaluation of CRMs at a component level and pre-processing methods for interface optimisation with recovery processes. *Resources, Conservation and Recycling* 161, 104923. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104923>.

COELHO, T. P., 2016. Noventa por cento de ferro nas calçadas: mineração e (sub) desenvolvimentos em municípios minerados pela Vale S.A. Tese (Doutorado em Ciências Sociais) - Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, UERJ. Rio de Janeiro, p. 332. Disponível em: <https://www.ufjf.br/poemas/files/2014/07/Coelhor-2016-Noventa-por-cento-de-ferro-nas-cal%c3%a7adas-Tese-de-Doutorado.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2021.

COMEX DO BRASIL, 2021. Cotado a US\$ 170 a tonelada, minério de ferro deve seguir entre destaques na pauta exportadora brasileira. Disponível em: <https://www.comexdobrasil.com/cotado-a-us-170-a-tonelada-minerio-de-ferro-deve-seguir-entre-destaques-na-pauta-exportadora-brasileira/>. Acesso em: 15 jan. 2021.

COMPOUND INTEREST, 2014. The Chemical Elements of a Smartphone. Disponível em: <https://www.compoundchem.com/2015/09/15/recycling-phone-elements/#comments>. Acesso em: 15 jan. 2021.

COMPOUND INTEREST, 2015. The Recycling Rates of Smartphone Metals. Disponível em: <https://www.compoundchem.com/2015/09/15/recycling-phone-elements/#comments>. Acesso em: 15 jan. 2021.

EUROPEAN COMMISSION, 2017. Manual for the use of the WEEE calculation tool. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/WEEE%20calculation%20tools/WEEE_calculation_tool_manual.pdf. Acesso em: 04. Fev. 2021

EUROPEAN COMMISSION, 2020. Critical materials for strategic technologies and sectors in the EU: a foresight study. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

EUROPEAN COMMISSION, sem data. Critical raw materials. Disponível em: https://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en. Acesso em: 18 dez. 2020.

EUROPEAN COMMISSION SCIENCE HUB, sem data. Why CRMs have a Supply risk? Disponível em: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=why-crms-have-a-supply-risk-8e8af9>. Acesso em: 18 Dez. 2020.

EUROPEAN UNION – EU, 2012. Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=EN>. Acesso em: 4. Fev. 2021.

FERRO, P., BONOLLO, F., 2019. Materials selection in a critical raw materials perspective. *Materials & Design* 177, 107848. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107848>.

FERRO, P., BONOLLO, F., 2020. How to apply mitigating actions against critical raw materials issues in mechanical design. *Procedia Structural Integrity* 26, 28-34. <http://dx.doi.org/10.1016/j.prostr.2020.06.005>.

GRIMES, S.M., MAGUIRE, D., 2020. Assessment of priorities in critical material recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Resources Policy* 68, 101658-101658. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2020.101658>.

GU, F., SUMMERS, P.A., HALL, P., 2019. Recovering materials from waste mobile phones: recent technological developments. *Journal of Cleaner Production* 237, 117657. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117657>.

HABIB, K., 2019. A product classification approach to optimize circularity of critical resources – the case of NdFeB magnets. *Journal of Cleaner Production* 230, 90-97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.048>.

HOFMANN, M., HOFMANN, H., HAGELÜKEN, C., HOOL, A., 2018. Critical raw materials: a perspective from the materials science community. *Sustainable Materials and Technologies* 17, e00074. <http://dx.doi.org/10.1016/j.susmat.2018.e00074>.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2019. Relatório Anual de Atividades: janeiro a dezembro de 2019. 63 p. Disponível em: <http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2020/10/relatorioanual-2019.pdf>. Acesso em: 6 jan. 2021.

IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO, 2020. SETOR MINERAL 1º TRIMESTRE 2020. Disponível em: http://portaldamineracao.com.br/wp-content/uploads/2020/04/PDF_DADOS_1oTRIM20_16ABR20_FINAL.pdf. Acesso em: 6 jan. 2021.

JRC - JOINT RESEARCH CENTRE, 2020. **CRMS LIST 2020**. Disponível em: <https://rmis.jrc.ec.europa.eu/?page=crm-list-2020-e294f6>. Acesso em: 7 dez. 2020.

LAPKO, Y., TRUCCO, P., 2018. Influence of power regimes on identification and mitigation of material criticality: the case of platinum group metals in the automotive sector. *Resources Policy* 59, 360-370, <http://dx.doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.08.008>.

LIXANDRU, A., VENKATESAN, P., JÖNSSON, C., POENARU, I., HALL, B., YANG, Y., WALTON, A., GÜTH, K., GAUß, R., GUTFLEISCH, O., 2017. Identification and recovery of rare-earth permanent magnets from waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* 68, 482-489. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.028>.

MAGALINI, F., WANG, F., HUISMAN, J., KUEHR, R., BALDÉ, K., STRAALLEN, V., HESTIN, M., LECERF, L., SAYMAN, U., AKPULAT, O., 2014. Study on collection rates of waste electrical and electronic equipment (WEEE). EU Commission. Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/weee/Final_Report_Art7_publication.pdf. Acesso em 06.Mai.2021.

PAVEL, C.C., MARMIER, A., DIAS, P.A., BLAGOEVA, D., TZIMAS, E., SCHÜLER, D., SCHLEICHER, T., JENSEIT, W., DEGREIF, S., BUCHERT, M., 2016. Substitution of critical raw materials in low-carbon technologies: lighting, wind turbines and electric vehicles. Publications Office of the European Union. EUR 28152. <http://dx.doi.org/10.2790/793319>

RAMESHKUMAR, S., PEDNEKAR, M., SARATCHANDRA, T., DOYLE, J., RAMESHBABU, P., 2019. Advanced Separation Processes for Recovery of Critical Raw Materials from Renewable and Waste Resources. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, 1-9. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.11533-4>

SCHRIJVERS, D., HOOL, A., BLENGINI, G.A., CHEN, W., DEWULF, J., EGGERT, R., ELLEN, L., GAUSS, R., GODDIN, J., HABIB, K., HAGELÜKEN, C., HIROHATA, A., HOFMANN-AMTENBRINK, M., KOSMOL, J., LE GLEUHER, M., GROHOL, M., KU, A., LEE, M., LIU, G., NANSAI, K., NUSS, P., PECK, D., RELLER, A., SONNEMANN, G., TERCERO, L., THORENZ, A., WÄGER, P.A., 2020. A review of methods and data to determine raw material criticality. *Resources, Conservation and Recycling* 155, 104617. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104617>.

XAVIER, L.H., OTTONI, M. S.O., ARAUJO, R.A., CUGULA, J.S., CONTADOR, L., PETRUNGARO, G.N., ABREU, L. P. P., SANTOS, L.A., REBELLO, R.Z., GOMES, C.F., SIERPE, R., MANÇANO, M.R., CARDOSO, E.R., ROMAY, K.V.M., SUEMITSU, W., CALDAS, M.B., 2020. Manual de destinação de resíduos eletroeletrônicos. Orientações à sociedade sobre como dispor adequadamente os resíduos eletroeletrônicos no estado do Rio de Janeiro. 3ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI.



CAPÍTULO 12

INDICADORES PARA A GESTÃO DE REEE

Luca Apolônio dos Santos

Graduando em Engenharia Ambiental
pela UFRJ

Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ

Mestre e Doutora em Engenharia de
Produção pela COPPE/UFRJ

Pesquisadora Titular CETEM/MCTI

12.1. Introdução

O aumento exponencial do consumo de equipamentos eletroeletrônicos se deve principalmente às constantes melhorias e inovações, reduções nos preços e à obsolescência programada (Awasthi *et al.*, 2018; Sajid, 2019).

No Brasil, em 2020, foram importados de janeiro a novembro US\$ 27 bilhões em produtos do setor eletroeletrônico e exportados US\$ 4 bilhões. No mercado oficial de telefones celulares, foram comercializados 47.606.580 aparelhos de julho de 2019 a julho de 2020 (ABINEE, 2021).

Cabe ressaltar que os volumes de importação são expressivamente superiores aos volumes de exportação dos equipamentos eletroeletrônicos. Em 2019, foram exportados US\$ 5,6 bilhões, contra US\$ 32 bilhões de importação. Nesse mesmo ano, foi realizado um faturamento de US\$ 38 bilhões, dois quais os maiores percentuais equivaleram aos segmentos de telecomunicações (24%), equipamentos industriais (18%) e informática (17%), enquanto 53% das importações e 44% das exportações foram concentradas em componentes elétricos e eletrônicos, segmento que inclui motocompressores para refrigeração, eletrônica embarcada e partes e peças.

De acordo com a ANATEL (2020), o Brasil conta com mais de 220 milhões de linhas ativas de telefonia móvel, em 2019, o que equivale a mais de um equipamento por pessoa no país. O estado de São Paulo possui 28% das linhas ativas do país e um crescimento de 1,7% em um ano. De acordo com Whilhelm (2012), os celulares permanecem em uso entre dois e cinco anos após a compra. Esse mesmo estudo indica que, nos Estados Unidos, são descartados mais de 140 milhões de celulares por ano, dos quais apenas 10% seriam devidamente descartados. Com base nesses dados e considerando-se a diversidade de produtos classificados, como equipamentos eletroeletrônicos, pode-se supor o volume de equipamentos que serão descartados no Brasil nos próximos anos.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/2010 e Decreto nº 7.404/2010) (BRASIL, 2010a; BRASIL, 2010b) estabelece os critérios para o descarte ambientalmente adequado de diferentes produtos pós-consumo por meio da implementação de Sistemas de Logística Reversa (SLR). Esses instrumentos regulamentadores estabelecem as ferramentas, para que sejam minimizados os potenciais impactos e abrem possibilidades para o aprimoramento das metodologias em vigor no país.

Entretanto, ainda, não há regulamentações que estabeleçam, por exemplo, quais os riscos que incorrem no manuseio dos equipamentos eletroeletrônicos e como os impactos podem ser mitigados, considerando-se as especificidades das diferentes categorias de equipamentos eletroeletrônicos, bem como as etapas de formas de destinação ambientalmente adequadas dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

Somando isso à presença de metais pesados e outras substâncias prejudiciais ao meio ambiente e à saúde humana nos REEEs, faz-se necessário o desenvolvimento de soluções sobre o descarte desses resíduos, para auxiliar na tomada de decisão, em conformidade com os requisitos legais (Falcon & Araújo, 2017). Para evitar o descarte inadequado de REEE, é necessário um sistema eficiente de Logística Reversa a ser estruturado e implementado, a partir de estudos prévios sobre a categoria. Um dos principais pilares para esses estudos é a quantificação desse tipo de resíduo, que permita um dimensionamento otimizado dos sistemas.

Desta forma, este capítulo tem por objetivo propor e analisar alguns indicadores, como os riscos potenciais, a estimativa da geração e categorização de REEE, como subsídio à implementação dos SLR e a gestão ambientalmente adequada.

12.2. Desafios da gestão de REEE

Dentre os principais desafios globais da gestão de REEE estão a obsolescência planejada, a falta de harmonização entre as regulamentações dos países, o design para o aterro (*design to dump*) e, mais recentemente, a gestão dos materiais críticos, tema abordado no Capítulo 11.

No Brasil, alguns fatores se somaram a essa lista de desafios, como o espaço entre a data de publicação da PNRS, que ocorreu, em 2013, e o atendimento ao Edital de Chamamento para a gestão dos REEEs, por meio do estabelecimento do acordo setorial da logística reversa, que aconteceu em 2019. Outro fator é o estabelecimento da responsabilidade compartilhada a partir da PNRS. O modelo vigente, em maior parte dos países, é a responsabilidade ampliada do produtor (Extended Producer Responsibility – EPR), no qual o produtor se responsabiliza civil e financeiramente pela gestão da logística reversa, ou sistema de take-back. No Brasil, a partir da responsabilidade compartilhada, entende-se que a indústria produtora, o distribuidor, o importador e o comércio são corresponsáveis pela implementação e gerenciamento dos resíduos eletroeletrônicos. Assim, representantes de todos esses seguimentos devem atender aos requisitos acordo setorial sob o acompanhamento dos órgãos fiscalizadores.

Nessa definição de responsabilidade compartilhada, estabelecida pela PNRS, cabe ainda aos consumidores a responsabilidade pela devolução dos produtos ao final de sua vida útil, o que implica a transferência de posse e a impossibilidade de reclamar um bem pós-consumo, doado ou vendido, para fins de logística reversa. Da mesma forma, os sistemas públicos de limpeza não fazem parte do sistema de logística reversa, sendo-lhes facultado da mesma forma que associações e cooperativas à prestação de serviços mediante remuneração. No entanto não se encontra formalmente incluída a indústria da reciclagem que é responsável pela manufatura reversa, recondicionamento, remanufatura e reciclagem dos REEEs. Seguramente, um aspecto a ser considerado num futuro próximo.

O acordo setorial dos equipamentos eletroeletrônicos foi assinado, no final do ano de 2019. A implantação do sistema de logística reversa teve início, em 2020, com a Fase 1 que compreende a estruturação. A Fase 2, com início em janeiro de 2021, prevê a efetividade da coleta de 1 % do volume em peso dos equipamentos eletroeletrônicos, colocados no mercado, no ano anterior à assinatura do acordo (ACORDO SETORIAL, 2019), conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Cronograma para o atendimento da meta percentual a ser coletada

Percentual a ser coletado e destinado a cada ano				
Ano 1 - 2021	Ano 2 - 2022	Ano 3 - 2023	Ano 4 - 2024	Ano 5 - 2025

(1%) (3%) (6%) (12%) (17%)

O acordo prevê, para a Fase 2, a instalação de Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) de Resíduos Eletroeletrônicos, nas cidades brasileiras com mais de 80.000 habitantes entre os anos de 2021 e 2025, que totalizam 400 cidades. Com esse fim, foi adotado um cronograma com o número de cidades a serem atendidas por estado a cada ano. Segundo a proposta de acordo setorial, ao final do período de implantação, em 2025, serão 400 cidades atendidas, das quais, 317 correspondem aos 10 estados apresentados na Tabela 2. As 317 cidades equivalem a 5,7% dos 5.565 municípios brasileiros.

Tabela 2. Cronograma implementação da Fase 2 em 10 estados brasileiros

Número de cidades a serem atendidas pelo sistema de logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos					
Estado	2021	2022	2023	2024	2025
SP	8	17	53	81	95
MG	3	6	19	32	44
RJ	3	7	20	28	33
PR	1	4	10	21	27
RS	1	5	13	19	25
BA	1	4	7	15	23
PA	0	1	4	7	20
PE	1	3	9	15	19
GO	1	3	6	10	16
SC	1	4	8	14	15
TOTAL	20	54	149	242	317

Fonte: Modificado a partir de BRASIL, 2013.

No anexo VIII do acordo setorial, são listadas as 400 cidades-alvo a serem atendidas pelo sistema de logística reversa. O documento apresenta as cidades por ordem de tamanho da população da maior para a menor, sendo os 17 primeiros lugares ocupados por municípios com mais de um milhão de habitantes no ano do estudo (2018). Entre eles encontram-se majoritariamente as grandes capitais e algumas cidades populosas dos estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. Em primeiro lugar, está o município de São Paulo, com 12.176.866 habitantes, seguido pelo Rio de Janeiro com 6.688.927 habitantes e a capital do país, Brasília, com 2.974.703 habitantes.

A partir da estimativa publicada por Forti *et al.* (2020), a geração per capita de resíduos eletroeletrônicos equivale a 10 kg por habitante anualmente. Assim, de acordo com a meta a ser

atingida ao final de 2021, as oito cidades mais populosas de São Paulo representam 18.400.000 habitantes que correspondem, segundo a geração per capita, a quase 184 mil toneladas de resíduos eletroeletrônicos a serem coletados e destinados.

Para tal, o estabelecimento de um sistema eficiente de logística reversa deve prever a instalação de pontos de entrega, recolhimento porta a porta ou ainda sistemas integrados de coleta, tratamento e destinação. De toda forma, apesar de percentuais tímidos, representam volumes significativos a serem gerenciados a partir da responsabilidade compartilhada entre os agentes responsáveis pela logística reversa.

12.3. Indicadores para a gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

Diferentes estudos compreendem a aplicação de indicadores para a gestão de REEE (Mueller *et al.*, 2009; Forti *et al.*, 2018; Boubellouta e Kusch-Brandt, 2020). Verifica-se que há uma ampla gama de abordagens possíveis, sendo que maior parte delas prioriza os potenciais impactos, a categorização e a estimativa da geração dos REEEs como subsídio ao processo decisório e a elaboração de instrumentos regulamentadores.

No entanto pela dificuldade apresentada de obtenção de dados, é comum recorrer a estimativas. Muitos autores já apresentaram modelos, por exemplo, para o cálculo da geração de REEE, chegando aos mais variados resultados. Cada modelo possui suas vantagens e desvantagens, sendo importante considerá-las na hora da escolha para um projeto. O Brasil, em particular, enfrenta dificuldades de estimativa ainda maiores. O país, com 8.510.296 Km², é o quinto maior em extensão territorial no mundo, sendo considerado um país de dimensões continentais (IBGE, 2019). Somado a seu tamanho, o Brasil é o oitavo país mais desigual do mundo (World Bank, 2017), o que também representa um obstáculo às estimativas. Awasthi (2018) analisa a geração de REEE dos países com seu PIB e sua população, chegando à conclusão de que há uma relação linear entre a riqueza de um país e sua geração de resíduos eletroeletrônicos, enquanto o tamanho da população não interfere de forma tão direta. Dessa forma, pelas altas taxas de desigualdade econômica no país, os dados devem ser preferencialmente estudados, de forma local, pois um dado, em nível nacional, dificilmente, representará a realidade de todas as regiões.

A seguir, é apresentada uma breve análise das principais tipologias de indicadores apresentados, com base em dados secundários e, em seguida, é discutida a aplicação desses indicadores.

12.3.1. Potencial de risco

A definição dos riscos inerentes aos REEEs tem sido considerada internacionalmente, com base na determinação dos riscos dos materiais, que fazem parte da constituição dos equipamentos pós-consumo, que resultam nessa categoria de resíduos. O principal documento orientador é a Diretiva sobre Restrições a Substâncias Perigosas (*Restriction of Hazardous Substances – RoHS*).

Essa diretiva, que está em sua terceira versão, apresenta os requisitos, para a gestão das dez substâncias prioritárias, em vigor desde 22 de julho de 2019, a saber:

Tabela 3. Limites para a gestão de substâncias perigosas em equipamentos eletroeletrônicos

Substância	Limite
Cádmio (Cd)	100 ppm
Chumbo (Pb)	1000 ppm
Mercúrio (Hg)	1000 ppm
Cromo Hexavalente (Cr VI)	1000 ppm
Bifenil Polibromado (PBB)	1000 ppm
Éteres Difenílicos Polibromados (PBDE)	1000 ppm
Bis (2-etilhexil) Ftalato (DEHP)	1000 ppm
Ftalato de Butil Benzílico (BBP)	1000 ppm
Dibutilftalato (DBP)	1000 ppm
Diisobutil ftalato (DIBP)	1000 ppm

Fonte: Adaptado a partir de RoHS 3, 2015. <https://www.rohsguide.com/rohs3.htm>.

A definição de tais limites configura como importantes indicadores, para a delimitação da composição de produtos e estão estreitamente vinculados ao desenho do produto, em conformidade com as restrições (Tabela 3). Produtos que não atendam a tais determinações tendem a ser preteridos, em relações comerciais, sob o risco de transferir a responsabilidade pela destinação ambientalmente adequada de produtos pós-consumo com teores superiores aos limites estabelecidos.

No Brasil, o parâmetro adotado para tais limites encontra-se definido na norma ABNT NBR 10.004:2004, cujos limites não expressam a diversidade ou limites aplicados aos resíduos eletroeletrônicos a partir de 2012. Cabe ressaltar que o Ministério do Meio Ambiente conduziu a elaboração de uma minuta da norma RoHS brasileira que adotaria as dez substâncias restritivas perigosas com limites ajustados e equivalentes ao cenário nacional. Essa minuta encontra-se finalizada aguardando publicação por meio de normativa do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA (MMA, 2018).

De acordo com a terceira versão da Diretiva Europeia RoHS, a partir de 22 de julho de 2021, os compostos DEHP, BBP, DBP e DIBP serão também aplicados a equipamentos médicos, incluindo *in vitro*, equipamentos de monitoramento, instrumentos de controle e ainda instrumentos de controle e monitoramento industrial. Da mesma forma, a categoria 11 da referida Diretiva incluirá outros equipamentos eletroeletrônicos, como: veículos de duas rodas, cigarros eletrônicos (e-cigarettes), vaporizadores de cannabis e vape-pens, bem como cabos com voltagem inferior a 250V.

12.3.2. Categorias de REEE

No Brasil, a partir do relatório elaborado pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI, 2013), os REEEs são classificados em:

1. **Linha Branca:** refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;
2. **Linha Marrom:** monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras;
3. **Linha Azul:** batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;
4. **Linha Verde:** computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares.

Segundo a Diretiva Europeia WEEE, os REEEs podem ser divididos em seis categorias distintas:

1. Equipamentos de troca de temperatura (geladeiras, freezers, ar condicionado e bombas de calor);
2. Telas e monitores (televisões, monitores, laptops, notebooks e tablets);
3. Lâmpadas (lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de LED e lâmpadas de descarga de alta intensidade);
4. Equipamentos de grande porte (máquinas de lavar, secadores de roupa, fogões elétricos, grandes impressoras, máquinas de copiar e painéis fotovoltaicos);
5. Equipamentos de pequeno porte (aspiradores de pó, torradeiras, microondas, ventiladores, calculadoras, rádios, barbeadores elétricos, câmeras, brinquedos, equipamentos eletrônicos, equipamentos médicos e pequenos equipamentos de monitoramento e controle);
6. Pequenos equipamentos de TI e telecomunicações (GPS, celulares, calculadoras de bolso, computadores pessoais, impressoras e telefones).

A Universidade das Nações Unidas (UNU) propõe a categorização dos resíduos eletroeletrônicos a partir de codificação conhecida como UNU-Keys, na qual constam 54 códigos para os principais produtos compreendidos na diretiva europeia.

Em recente publicação do Centro de Tecnologia Mineral, foram propostas oito categorias de REEE:

1. Eletrodomésticos (Refrigeradores, Secadoras de Roupa, Fogões, Lavadoras, Fornos Elétricos, Fornos de Microondas, Aparelhos de Ar-condicionado, Freezers Horizontais e Verticais, Frigobares, Lava-louças, entre outros);

2. Eletroportáteis (Batedeiras, secadores de cabelo, liquidificadores, furadeiras, aspiradores de pó, ferros elétricos, cafeteiras, aquecedores, centrífugas, máquinas de costura, máquinas de escrever, vaporizadores, câmeras fotográficas analógicas, ventiladores, barbeadores, multiprocessadoras, torradeiras, ferramentas, brinquedos, rádios comunicadores, etc. Componentes de áudio, projetores, filmadoras, aparelhos de VHS, DVD, Blu-ray, aparelhos de som e home-theaters, e outros);
3. Monitores (Monitores e telas do tipo Tubo de Raios Catódicos (CRT), Telas de Cristal Líquido (LCD), monitores de LED e outros. Encontrados em aparelhos de TV, computadores, jogos eletrônicos, etc);
4. Informática e telecomunicações (Computadores desktops, notebooks, periféricos, fax, tablets, impressoras, iPods, celulares, secretárias eletrônicas, placas de circuito integrado, reatores, discos rígidos, fitas de backup, copiadoras, gravadores de CD, DVD e VHS, plotters, scanners, terminais de caixa, terminais inteligentes, unidades de armazenamento externo, roteadores, thin clients, cartuchos de tinta, toners, acessórios, mídias, PABX, modems, MP3 players, netbooks, smartphones, teclados, mouse, câmeras fotográficas digitais, videogames, videokes, microfones, calculadoras, fones de ouvido, etc);
5. Fios e cabos;
6. Pilhas e baterias;
7. Lâmpadas (fluorescentes clássicas, fluorescentes compactas, lâmpadas de sódio, lâmpadas de mercúrio, lâmpadas incandescentes);
8. Painéis fotovoltaicos.

Apesar de todos os aparelhos citados fazerem parte da categoria de REEE, há grande diversidade entre eles. Cada um possui seu próprio tamanho, tecnologia, marca, vida útil e pode estar submetido a diferentes hábitos de descarte do consumidor. Por essa grande variedade, é difícil monitorar corretamente a quantidade de resíduos que é descartada anualmente em cada local.

Além disso, o setor de reciclagem no Brasil ainda enfrenta grande informalidade, o que é um obstáculo à coleta de dados. Não se sabe com precisão a quantidade de resíduos que circula entre empresas e cooperativas informais, além de serem comuns também outras formas de destinação dos aparelhos obsoletos como doação, desmonte, venda das peças ou até mesmo armazenagem em casa. Dessa forma, torna-se inviável a consolidação de dados concretos sobre o quanto de fato são gerados, descartados e reciclados em território nacional.

A Universidade das Nações Unidas (UNU), por sua vez, propõe uma categorização mais ampla com 54 categorias e ajustada à categorização proposta pelas esferas comerciais. Desta forma, adequando o reconhecimento dos produtos eletroeletrônicos pós-consumo, especialmente, no âmbito de transporte entre estados ou países. Ressalta-se, nesse caso, que a Convenção da Basileia restringe o movimento transfronteiriço de resíduos entre países (Vide Capítulo 6).

Os principais métodos de categorização de e-waste foram analisadas em um estudo da Comissão Europeia (MAGALINI *et al.*, 2016). Essa análise compara as categorizações PRODCOM, WEEE Forum, Diretiva WEEE e UNU-Keys, conforme apresentado na Tabela 4.

Conforme apresentado na Tabela 4, as classificações com maior diversidade, quanto ao número de categorias, receberam melhor pontuação quanto aos critérios estabelecidos, sugerindo que quanto maior a classificação dos tipos de equipamentos eletroeletrônicos, maior a possibilidade de uma gestão eficiente em relação aos quesitos de sustentabilidade considerados.

Tabela 4. Comparação dos métodos de classificação de EEE/REEE

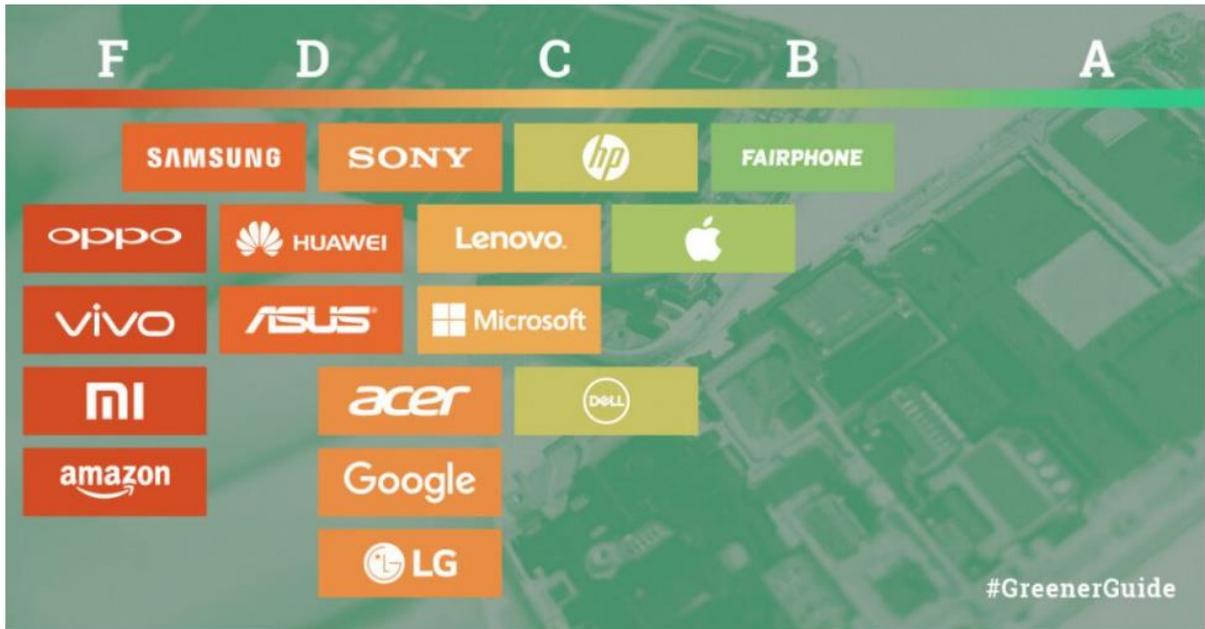
Classificação	Comportamento de Mercado	Peso médio/Vida-útil	Conversível às seis categorias da Diretiva WEEE	Relevância Ambiental	Número de Categorias
Classificação estatística da PRODCOM e da CN	+	+	+	+	160-250 (PRODCOM)
Classificação do WEEE Forum	+	-	+	-	17
10 Categorias da antiga Diretiva WEEE (2002)	-	-	-	-	10
Seis categorias nova versão da Diretiva WEEE (2012)	-	-	+	-	6
UNU-KEYs	+	+	+	+	54

Fonte: Adaptado a partir de MAGALINI *et al.* (2016).

12.3.3. Indicadores de performance

Em 2017, o *Greenpeace*, ONG que representa causas ambientais, publicou uma versão do guia para eletrônicos verdes (*Greener Guide*). Essa publicação evidenciava um ranking das 17 marcas líderes na produção de equipamentos eletroeletrônicos, de acordo com ações para mitigar impactos ambientais pela entidade. A escala avalia as marcas de A (mais sustentável) até F (menos sustentável), apresentada na Figura 1.

Figura 1: Índice de impacto das principais marcas de eletroeletrônicos de uso pessoal.



Fonte: <https://www.greenpeace.org/usa/research/guide-to-greener-electronics-2017/>

Os indicadores foram analisados, para cada uma das empresas, segundo três grupos de critérios: energia, recursos e produtos químicos. Em cada um dos critérios, foram avaliados os mesmos indicadores com pesos específicos, conforme a seguir:

- **Transparência (peso 30%):** avaliação da publicidade de informações relativas ao consumo energético, emissão de gases de efeito estufa, insumos utilizados, uso de substâncias químicas perigosas nos produtos produzidos e ao longo da cadeia de suprimentos;
- **Comprometimento (peso 30%):** avaliação compromisso das empresas em identificar e eliminar produtos químicos perigosos em produtos e ao longo da cadeia de suprimentos. Avaliação da transição dos produtos, considerando ciclos fechados (closed-loop), uso de matéria-prima secundária, extensão da vida útil e recuperação do material ao final da vida;
- **Desempenho (peso 30%):** mensuração do progresso na redução do uso de energia renovável e de suas emissões de gases de efeito estufa (segundo Protocolo de Quioto), em suas próprias operações e ao longo da cadeia de suprimentos. Avalia-se, ainda, se as políticas, o design de produtos e suporte ao cliente são orientados para estender a vida útil de seus dispositivos, desacelerando o consumo de energia, recursos e outros impactos na cadeia de suprimentos;
- **Iniciativa (peso 10%):** avaliação baseada nas ações que as empresas realizam, para defender políticas ambiciosas de conservação energética e uso de materiais, bem como atitude e transparência na redução ou eliminação de substâncias perigosas.

12.3.4. Projetos de rastreabilidade

Alguns equipamentos eletroeletrônicos dispõem de códigos de identificação que podem ser utilizados com a finalidade de rastreamento, tais como o número de série (*serial number*) e códigos do produto. Esses identificadores são sequências únicas e permitem o rastreamento, ao longo da cadeia de suprimentos, na logística reversa, ou seja, permitem a identificação do produto, bem como a identificação das peças, partes e componentes que deles derivam.

Nesse sentido, a empresa Circular Brain (<https://circularbrain.io/>) desenvolveu uma solução interessante, com a finalidade de identificar o caminho percorrido pelo produto pós-consumo desde o seu descarte, passando pela armazenagem, acondicionamento, desmontagem e recuperação de materiais. Para tanto, são utilizados conceitos como rastreabilidade, balanço de massa e economia circular.

Uma importante iniciativa brasileira foi o Sistema de Identificação, Rastreamento e Autenticação de Mercadorias - Brasil ID (<http://brasil-id.org.br/>), iniciado em 2009 e finalizado em 2018. O projeto foi financiado pela FINEP e teve como objetivo o uso de identificador por radiofrequência (RFID), em um padrão único, para identificação, autenticação e rastreamento de mercadorias em produção e circulação pelo país. A iniciativa se deu, por meio de cooperação entre o Ministério da Ciência e Tecnologia, a Receita Federal e os Estados da União, por intermédio de suas Secretarias de Fazenda. Tal iniciativa poderia ser adaptada ao rastreio de equipamentos pós-consumo que ainda não tivessem sido desmontados, ou até mesmo peças, partes e componentes capazes de serem rastreadas.

12.3.5. Estimativa da geração de REEE

O principal levantamento mundial da geração de REEE é fornecido pelo Global E-Waste Monitor (GEM) (www.ewastemonitor.info), que desde 2014, tem publicado análises e estimativas sobre o tema. De acordo com a edição mais recente (Forti *et al.*, 2020), foram gerados, mundialmente, em 2019, 53,6 milhões de toneladas métricas (Mt) de REEE, o que equivale a 7,3 kg per capita. O crescimento foi estimado em 4% ao ano, superior ao percentual estimado para o total de resíduos totais gerados mundialmente.

Apesar da importância da identificação dos volumes de REEE gerados e especificação das respectivas categorias, apenas 17,4% do total gerado numa escala global foram oficialmente documentados, bem como coletados e reciclados (Forti *et al.*, 2020). Desse percentual, Europa e Ásia constam como continentes com maior percentual de dados oficiais, com 42,5% e 11,7%, respectivamente. As Américas contam com 8,8%, com destaque para a América do Norte, e a África tem o menor percentual, 0,9%. O restante consiste em estimativas baseadas, por exemplo, em densidade populacional, produtos comercializados no ano (*Placed on Market* – PoM), renda e PIB. Segundo essa publicação, o Brasil gerou 2143 t de resíduos eletroeletrônicos em 2019, com uma média anual de 10.2 kg/hab (Forti *et al.*, 2020).

Outro estudo, publicado em 2012 pela Agência Nacional de Desenvolvimento Industrial (ABDI), também propôs um método para estimar a geração Brasileira de REEE (ABDI, 2013). Foi

adotada a seguinte fórmula para calcular o volume inserido de um equipamento eletrônico p em um ano t:

$$\text{Volume de EEE } p(t) = \text{Vendas } p(t) / [1 - \text{Cinza } p(t)] + \text{Importação } p(t) - \text{Exportação } p(t)$$

Em que:

- Vendas p (t): Volume de vendas do produto no ano t;
- Cinza p (t): Percentual do mercado cinzado do produto p no ano t;
- Importação p (t): Importação do produto p no ano t;
- Exportação p (t): Exportação do produto p no ano t;

O volume de vendas em unidades é então multiplicado pelo peso médio do produto, chegando ao peso gerado daquele produto em determinado ano. Foi estimada então uma média de 4.79-7.19 kg/hab/ano, valor que foi comparado às estimativas de geração de outros países a partir do valor do PIB. O valor mínimo obtido (4.79 kg/hab/ano) ficou mais próximo do valor esperado para o Brasil em razão de seu PIB. Os países adotados, para fins de comparação, eram do continente europeu e seus dados de geração também eram baseados em estimativas, o que traz desvantagens para o método.

Uma alternativa, para aumentar a confiabilidade do método, é reproduzi-lo, utilizando dados mais recentes, além de optar por comparações com países de realidade mais parecida com a brasileira, como os países da América Latina ou países em desenvolvimento.

Em 2008, um estudo brasileiro sugeriu um novo método para estimar a geração de Resíduos Eletroeletrônicos no país (Araújo *et al.*, 2012). Ele propôs adotar diferentes metodologias para mercados de produtos maduros e não maduros, considerando que eles demandam diferentes abordagens. Os mercados de produtos maduros foram definidos como aqueles cuja taxa de crescimento é semelhante à taxa de crescimento da população, enquanto os não maduros são aqueles em que a demanda cresce mais rapidamente que a população ou aqueles com ondas repentinas de mudança tecnológica (reduzindo o ciclo de vida de produtos com tecnologia mais antiga). Esse método não leva em consideração importações e exportações. São aplicadas as seguintes equações:

- Para os mercados de produtos maduros (geladeiras, máquinas de lavar, televisões, freezers e sistemas de som) - Método de Uso e Consumo para um ano i:

$$(\text{Geração de REEE})_i = \text{número de aparelhos em uso no ano}_i / \text{vida útil média}$$

- Para mercados não maduros (computadores e celulares) - Método do intervalo de tempo:

$$\text{(Geração de REEE)}_i = \text{vendas no ano}_i - (\text{número de aparelhos em uso no ano}_i - \text{número de aparelhos em uso no ano}_{i-1})$$

Esse estudo estimou a geração em 3,77 kg/hab para o ano de 2008. O valor alcançado é muito diferente das estimativas mais recentes para o país, o que provavelmente se deve à data do estudo e ao aumento do uso de eletroeletrônicos desde então. Esse método traz a vantagem de não utilizar dados de vida útil dos produtos não maduros, o que reduz sua incerteza, uma vez que esses produtos têm vida útil muito variável dependendo da marca, da tecnologia e dos hábitos de uso do consumidor. É importante ressaltar também que a classificação dos mercados de produtos entre maduros e não maduros pode ter mudado, ao longo dos anos, pelos avanços tecnológicos. Além disso, o estudo considerou apenas sete tipos de eletroeletrônicos, o que também influenciou nos resultados encontrados.

Posteriormente, foi proposto outro método, para estimar a geração de REEE, dessa vez, com foco na cidade de São Paulo, SP (Rodrigues *et al.*, 2015). É importante ressaltar que a capital concentra a maior população e o maior PIB *per capita* do país, que a coloca acima da média de geração de resíduos de outras cidades brasileiras. O estudo baseou-se em três variáveis:

- A quantidade de EEE em uso nos domicílios da amostra;
- A quantidade de EEE fora de uso nos domicílios da amostra e suas respectivas condições de funcionamento e tempo de aquisição;
- A quantidade de EEE descartados no período de cinco anos, suas condições de funcionamento e alternativas para o descarte.

Foram considerados no estudo 26 categorias de eletroeletrônicos e seus respectivos tempos de vida útil e peso: aparelho de som; aspirador de pó; barbeador e depilador; batedeira e *mixer*; computador; DVD; ferro de passar; freezer; microondas; furadeira; geladeira; impressora; liquidificador; máquina de lavar roupa; monitor-CRT; monitor-LCD; MP3 e MP4; notebook; rádio; sanduicheira, grill e torradeira; secador e chapinha; telefone celular; televisor; televisor LCD; ventilador e videocassete. A partir de princípios estatísticos, foi definida uma amostra da população e então foi aplicado um questionário à essa amostra selecionada (no final do ano de 2009 e início de 2010). O estudo propõe quatro cenários de descarte de EEE, na seguinte ordem (do melhor para o pior):

- Cenário 1: Só são considerados resíduos os equipamentos “quebrados” ou funcionando precariamente no momento do descarte;
- Cenário 2: Somente os EEE descartados são considerados resíduos, excluindo aqueles que foram encaminhados para a reutilização (doados ou vendidos a terceiros);

- Cenário 3: Somente 75% dos EEE descartados e encaminhados para a reutilização foram de fato reutilizados, portanto 25% deles se tornaram REE + os já descartados como resíduos;
- Cenário 4: Somente 50% dos EEE descartados e encaminhados para a reutilização foram de fato reutilizados, portanto os outros 50% se tornaram REE + os já descartados como resíduos.

A partir dos dados do questionário, dos dados sobre a vida útil do aparelho e da população de São Paulo, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 5, conforme os cenários analisados.

Tabela 5. Estimativa da geração/hab/ano de REEE, por cenário, município de São Paulo, 2006/2010

Cenário	Geração média per capita (kg/hab/ano)
1	2,0
2	1,4
3	2,3
4	3,1

Esse estudo mostra-se valioso por calcular as estimativas, a partir de dados primários obtidos por um questionário, além de apresentar uma metodologia que pode ser aplicada a outros municípios. Os resultados encontrados são uma importante referência de geração em nível local no país. Como os dados utilizados foram coletados, nos anos de 2009 e 2010, é provável que estejam defasados pelos rápidos avanços tecnológicos da última década, portanto é recomendável um estudo posterior utilizando dados atualizados.

Mais recentemente, Abbondanza & Souza (2019) buscaram reduzir as incertezas dos métodos anteriores, utilizando pesquisas para coletar dados, para o Método de Estimativa da Oferta de Mercado de REEE. Para isso, pediram aos entrevistados que informassem dados como o número de equipamentos adquiridos, nos últimos anos, o número de equipamentos em uso e a idade dos equipamentos recentemente descartados. O estudo foi feito, em escala local, na cidade de São José dos Campos, no estado de São Paulo, dividindo os resultados, de acordo com as zonas da cidade nas quais moravam os habitantes (que divergiam em número de habitantes, renda familiar média e IDH, o que foi levado em consideração nos resultados). Esse estudo apresentou vida útil média dos equipamentos diferente dos estudos anteriores, uma vez que os dados foram obtidos pela população e não dos fabricantes. Uma vantagem é que os valores de vida útil foram representados por distribuição probabilística e não como valores discretos, como nos estudos anteriormente citados. A junção de variáveis quantitativas e qualitativas, para a aplicação do

Método de Oferta de Mercado, confere considerável confiabilidade ao estudo, que apresentou estimativa de 4kg/hab/ano em 2017.

De acordo com os relatórios do *Global E-Waste Monitor* (Baldé et al., 2015; Baldé et al., 2017 e Forti et al., 2020), foram gerados anualmente, no Brasil, 1,4 mil toneladas, em 2014, 1,5 mil toneladas, em 2016 e 2,1 mil toneladas, em 2019. Os valores de geração per capita de resíduos eletroeletrônicos, no Brasil, foram 7 kg, em 2014, 7,4 kg, em 2016 e atingiu 10,2 kg, em 2019, o que equivale a um acréscimo médio anual de 12,6% entre os últimos dois anos do estudo (de 2016 a 2019) e um aumento de 2,8% entre 2014 e 2016.

Segundo os estudos citados, foram obtidas as estimativas de geração de REEE para o Brasil entre os anos de 2008 e 2019 (Tabela 6).

Tabela 6. Estimativas apresentadas para a geração de REEE no Brasil

Ano base	Geração média per capita (kg/hab/ano)	Abrangência	Estudo
2008	3,8	Brasil	Araújo et al. (2012)
2011	4,79-7,19	Brasil	ABDI (2013)
2014	7	Brasil	StEP (2015)
2015	2,9-6,0	São Paulo	Rodrigues et al. (2015)
2014 e 2016	7,0 e 7,4	Brasil	Baldé et al., 2015 e 2017
2017	4,0	São José dos Campos	Abbondanza & Souza (2019)
2019	10,2	Brasil	Forti et al. (2020)

Todos os métodos de estimativa apresentados possuem vantagens e desvantagens, que devem ser levados em conta, ao analisar os resultados e, também, ao adotá-los em projetos. Para o Brasil, pela grande extensão territorial e altos índices de desigualdade social, é mais recomendada a adoção de métodos de estimativa local, como os de Rodrigues et al. (2015) e Abbondanza & Souza (2019), que também possuem maior confiabilidade por serem realizados a partir de dados primários. Apesar disso, os métodos de Forti et al. (2020), ABDI (2013) e Araújo et al. (2012) também apresentam a vantagem de utilizar dados de mercado, não estando sujeitos às incertezas da memória dos consumidores. Também seria importante a replicação de ABDI (2013) e Araújo et al. (2012), utilizando dados mais recentes, por causa dos grandes avanços da tecnologia nos últimos anos.

Apesar de existirem diversos métodos de estimativa, a busca por dados primários sempre é preferível. Por isso, é importante a consolidação do sistema de logística reversa e a formalização das empresas do segmento, pois somente dessa forma é possível saber a quantidade de REEE que é, de fato, gerada, coletada e processada no país.

12.4. Conclusões

O estudo da gestão de resíduos eletroeletrônicos apresenta um alto grau de complexidade, em razão das variáveis socioeconômicas e ambientais envolvidas e, por isso, resulta em um significativo desafio para as nações que buscam cumprir com os requisitos que constam nos instrumentos regulamentadores. Na ausência de leis e normas sobre a temática, coloca-se a necessidade de gestão das soluções, para a comercialização dos REEE, que apresentam potencial risco por substâncias perigosas presentes em sua composição.

Estabelecer a definição dos indicadores que possibilitem identificar os riscos e o potencial comercial envolvido na gestão dos REEE tem sido o objetivo principal de diferentes países. Neste capítulo, apresentamos algumas das principais metodologias, os tipos de indicadores analisados e ainda métodos diferenciados para a identificação de categorias, avaliação de empresas e definição da geração de REEE.

Os diferentes métodos sugerem, por um lado, a necessidade de ajustes, em função da disponibilidade de dados ou ainda do objetivo a ser alcançado por parte do gestor e requisitos do processo decisório. Por outro lado, verifica-se um amplo campo, para o aprimoramento das técnicas, que utilizam indicadores para a gestão de REEE.

O Brasil, a partir do ano de 2021, inicia a implementação e validação dos sistemas de logística reversa, a partir do estabelecimento da meta de coleta e destinação de 1% do volume, em peso gerado, no ano anterior à assinatura do acordo setorial. A estimativa desse valor ainda depende da correta avaliação do valor PoM e, da mesma forma, dos valores de importação e exportação. A equação ganha maior complexidade quando se percebe a necessidade de padronização das terminologias das categorias de equipamentos eletroeletrônicos que ainda possui significativa diversidade em relação às fontes de consulta. Em poucas palavras, as categorias de equipamentos eletroeletrônicos informados, por exemplo, pela Receita Federal, para busca de equipamentos importados e exportados, nem sempre corresponde às categorias de equipamentos definidos pelos documentos oficiais para a logística reversa, ou ainda pelos métodos internacionais. Assim, um mesmo produto pós-consumo pode ser identificado em multiplicidade ou ainda deixar de ser contabilizado para fins de logística reversa. Para se avançar de estimativas, para a coleta de dados primários, ainda há um longo caminho a ser percorrido no país e, desta forma, instrumentos que permitam a harmonização e universalização dos métodos são desejáveis e, por isso, devem ser priorizados.

Referências

- ABBONDANZA, M.N.; SOUZA, R.G. Estimating household e-waste generation in municipalities using primary data from surveys: case of Sao Jose dos Campos, Brazil. *Waste Management*, v.85, p. 371-384, 2019.
- ABDI - AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos - análise de viabilidade técnica e econômica. 179p. Brasília, 2013. https://sinir.gov.br/images/sinir/LOGISTICA_REVERSA/EVTE_ELETROELETRONICO

ABINEE, 2021. Desempenho Setorial – Decon – ABINEE. Desempenho do setor brasileiro de Eletroeletrônicos no ano de 2020. Disponível em: <<http://www.abinee.org.br/abinee/decon/decon15.htm>>. Acesso em: 08 de janeiro de 2021.

ACORDO SETORIAL, 2019. Acordo Setorial para Implantação do Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos de Uso Doméstico e Seus Componentes. www.cetem.gov.br/reminare

ANATEL, 2019. Brasil registra 228,64 milhões de linhas móveis ativas em maio de 2019. Disponível em: <<https://antigo.anatel.gov.br/institucional/noticias-destaque/2310-brasil-registra-228-64-milhoes-de-linhas-moveis-ativas-em-maio-de2019>>. Acesso em 8 de janeiro de 2021.

ARAÚJO, M.G., MAGRINI, A., MAHLER, C.F., BILITEWSKI, B. A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. *Waste Manag.* 32, 335342, 2012. Disponível em <<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.09.020>>.

AWASTHI, A.K., WANG, M., AWASTHI, M.K., WANG, Z., LI, J., 2018. Environmental pollution and human body burden from improper recycling of e-waste in China: A short-review. *Environmental Pollution* 243, Part B, 1310-1316. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.037>.

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. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/Global-E-waste%20Monitor%202017%20.pdf>. Acesso em janeiro de 2021.

BALDÉ, C.P., WANG, F., KUEHR, R., HUISMAN, J. (2015), The global e-waste monitor – 2014, United Nations University, IAS – SCYCLE, Bonn, Germany. Disponível em: <https://i.unu.edu/media/unu.edu/news/52624/UNU-1stGlobal-E-Waste-Monitor-2014-small.pdf>. Acesso em janeiro de 2021.

BOUBELLOUTA E KUSCH-BRANDT, 2020. Testing the environmental Kuznets Curve hypothesis for E-waste in the EU28+2 countries. *Journal of Cleaner Production*, Volume 277, 20 December 2020, 123371. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652620334168>>

BRASIL, 2010a. 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: 08 de janeiro de 2021.

BRASIL, 2010b. Decreto Nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010. Estabelece normas para a execução da Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 08 de janeiro de 2021.

CUCCHIELLA, F., D'ADAMO, I., KOH, S. L., ROSA, P., 2015. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, 263-272.

DIRETIVA ROHS, 2011. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32011L0065>>. Acesso em 8 de janeiro de 2021.

FALCON, E.M.S.; ARAÚJO, F.. Desafios à gestão de resíduos eletroeletrônicos em conformidades aos requisitos legais: estudo em uma Instituição Federal de Ensino Superior do Estado do Rio de Janeiro. Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego, 2017.

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.

FORTI, V., BALDÉ, C.P., KUEHR, R., 2018. E-waste Statistics. Guidelines on classification, reporting and indicators. Disponível em: http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6477/RZ_EWaste_Guidelines_LoRes.pdf Acesso em 8 de janeiro de 2021.

IBGE. Brasil | Cidades e Estados | IBGE, 2020. Dados sobre o Brasil. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados.html?view=municipio>. Acesso em: 18 de dez. de 2020.

MAGALINI, FEDERICO, WANG, FENG, HUISMAN, JACO, KUEHR, RUEDIGER, BALDÉ, KEES, STRAALLEN, VINCENT, HESTIN, MATHIEU, LECERF, LOUISE, SAYMAN, UNAL, AKPULAT, ONUR. (2016). Study on Collection Rates of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), possible measures to be initiated by the Commission as required by Article 7(4), 7(5), 7(6) and 7(7) of Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). Disponível em: https://ec.europa.eu/environment/waste/weee/pdf/Final_Report_Art7_publication.pdf. Acesso em janeiro de 2021.

MMA, 2018. GT discute legislação para eletroeletrônicos. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/noticias/noticia-acom-2018-05-3010>. Acesso em janeiro de 2021.

Modelling the correlations of e-waste quantity with economic increase. Science of the Total Environment, 613-614, 46-53, 2018.

MUELLER, E., SCHULEP, M., WIDMER, R., GOTTSCHALK, F., BONI, H., Assessment of e-waste flows: a probabilistic approach to quantify e-waste based on world ICT and development indicators.

Disponível: https://www.dora.lib4ri.ch/empa/islandora/object/empa%3A8838/datastream/PDF/M%C3%BCller-2009-Assessment_of_e-waste_flows-%28published_version%29.pdf. Acesso em janeiro de 2021.

RODRIGUES, A.C., GUNTHER, W.M.R., BOSCOV, M.E.G., 2015. Evaluation of Waste of Electric and Electronic Equipments Generation From Households: Proposal of Method and Application to the City of São Paulo. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: Pro. Eng Sanit E Ambient, Brazil, p. 20. Disponível em <https://doi.org/10.1590/S1413-41522015020000133701>.

SAJID, M.; SYED, J.H.; LQBAL, M., ABBAS, Z., HUSSAIN, I.; BAIG, M.A. Assessing the generation, recycling and disposal practices of electronic/electrical-waste (E-Waste) from major cities in Pakistan. Waste Management, v. 84, p. 394-401, 2019.

SINIR, 2019. https://sinir.gov.br/images/sinir/Acordos_Setoriais/Eletroeletr%C3%B4nicos/ANEXO_VII.pdf

WHILHELM, W.B. Encouraging Sustainable Consumption through Product Lifetime Extension: The Case of Mobile Phones. International Journal of Business and Social Science, Vol. 3 No. 3, 2012. Disponível em: <http://www.ijbssnet.com/journals/Vol_3_No_3_February_2012/2.pdf>. Acesso em 8 de janeiro de 2021.

WORLD BANK. Countries ranked by GINI index (World Bank estimate). Índices mundiais de desigualdade, 2019. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/facts/indicators/SI.POV.GINI/rankings>>. Acesso em: 09 de dez. de 2020.



CAPÍTULO 13

LÂMPADAS DE LED: Legislação, caracterização e recuperação de metais

Rafaela Zamprogno Rebello

Engenheira Ambiental pela UFES
Mestranda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais
pela COPPE/UFRJ
Bolsista do Projeto DATARE - CETEM/MCTI

Lúcia Helena Xavier

Bióloga pela UFRJ
Mestre e Doutora em Engenharia de
Produção pela COPPE/UFRJ
Pesquisadora Titular CETEM/MCTI

13.1. Introdução

Nas últimas décadas, as empresas de eletroeletrônicos transformaram o globo de tal forma que esses produtos passaram a ser inevitáveis na vida cotidiana. Os aparelhos eletrônicos incluem variedades de utensílios essenciais, como geladeiras, televisões, máquinas de lavar, smartphones, laptops e até lâmpadas. Como as aplicações de tais itens aumentou exponencialmente, a geração de seus resíduos associados é uma certeza. Apesar de indispensáveis, o surgimento de novas tecnologias e a redução de sua vida útil, por meio da obsolescência programada, transforma esses equipamentos em vilões, caso não tenham sua logística reversa realizada (FORTI *et al.*, 2020).

Iniciativas de vários países são observadas com relação à gestão de eletroeletrônicos, principalmente os que fazem parte da União Europeia, porém ainda são poucas as legislações que abordam a temática das lâmpadas de LED (UNIÃO EUROPEIA, 2012). O governo brasileiro apresenta dois acordos setoriais que poderiam abranger essa área: o Acordo Setorial para a implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes e o Acordo Setorial para a implantação do Sistema de Logística Reversa de Lâmpadas Fluorescentes, de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista, porém, além de não apresentarem como escopo a gestão de lâmpadas de LED, também não demonstram eficiência quando analisado o panorama atual e as metas pré-estabelecidas (MMA, 2015; MMAa, 2019). Sendo assim, é importante frisar a necessidade de desenvolvimento tecnológico, com soluções práticas e viáveis para a reciclagem, reúso e condicionamento desse tipo de fonte luminosa.

Atualmente, a reciclagem de lâmpadas fluorescentes de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista desperta interesse, quando se leva em conta a quantidade comercializada e descartada a cada ano, porém, com a evolução da tecnologia, há uma tendência dos diodos emissores de luz (LED) em substituí-las gradualmente. Algumas características, como a eficiência energética, resistência a impacto, tempo de vida útil e o fato de não possuírem mercúrio em sua composição, fazem com que o LED se apresente como um produto mais que versátil (LIM *et al.*, 2012). Além disso, organizações internacionais e muitos países estão promovendo o uso de lâmpadas LED na iluminação pública, sobretudo, pelo menor consumo de energia (UNEP, 2017). Estima-se que, em 2030, LEDs irão compor 84% do mercado e reduzirão em até 40% o consumo de energia utilizada por fontes luminosas, gerando receita superior a 54 milhões de dólares em 2022 (ANNONI, 2020).

Como para outras tipologias de resíduos, a reciclagem de lâmpadas LED também possui um apelo econômico e ambiental. A recuperação de metais de LEDs é um tema relevante, pois enquadrado no eixo de mineração urbana, esse resíduo pode auxiliar no fornecimento de matérias-primas escassas, sendo uma fonte secundária importante, principalmente para países que dependem de recursos importados (OLIVEIRA *et al.*, 2020). A caracterização de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE) é etapa essencial para que o processo de reciclagem se torne viável. Sendo assim, considera-se importante, principalmente, a identificação de elementos que possuam valor agregado e os que se apresentam em elevadas concentrações (DOS SANTOS

et al., 2020). A partir de um estudo de caracterização, alternativas de reciclagem, oportunidades e lacunas surgem, bem como prioridades a serem consideradas.

Entre os materiais que constituem as lâmpadas de LED, pode-se destacar a presença notável de componentes eletrônicos (13,0 p%) e metais (18,0 p%), que compreendem a parte mais valiosa desse resíduo e possibilita uma logística reversa lucrativa (REBELLO *et al.*, 2020). Entre os metais, as terras-raras têm um papel crucial na indústria eletrônica, porém, de maneira geral, poucos estudos abordam a viabilidade econômica de sua reciclagem, quando provenientes de lâmpadas inservíveis, e os existentes apontam para a baixa lucratividade dessa atividade (QIU & SUH, 2019). O ouro, então, torna-se o principal metal presente nas lâmpadas de LED.

Entre as evidências encontradas, observa-se que um dos principais problemas relacionados a esse tema é a inexistência de um sistema de reciclagem padronizado para os diodos, desde a coleta até sua disposição final (CENCI *et al.*, 2020). Para a recuperação de metais provenientes de lâmpadas de LED, são apontados processos hidrometalúrgicos como rota principal, pelo seu baixo impacto ambiental, quando comparados aos pirometalúrgicos, por exemplo, (ANNONI *et al.*, 2020; ZHAN *et al.*, 2015).

Ainda são escassas informações sobre rotas, em especial, em escala piloto e industrial, para a recuperação desses elementos, destacando-se na literatura apenas processos de bancada, os quais não apresentam sua viabilidade econômica e acabam por não corresponderem à realidade do mercado. A partir disso, algumas análises foram realizadas, de acordo com os dados de caracterização apresentados, visando estabelecer o potencial econômico inicial de recuperação das lâmpadas de LED.

13.2. Legislação mundial sobre resíduos de lâmpadas de LED

Entre as transformações de design, funcionalidade e a descoberta de novas tecnologias, o setor de iluminação se modifica de forma constante. Diante da possibilidade da redução nas contas de energias, iniciou-se, segundo Gil-de-Castro *et al.* (2017), em diferentes locais, a aprovação de mecanismos legais, a fim de encerrar o uso de lâmpadas incandescentes, entre eles a União Europeia (2009), Canadá (2015), Brasil (2015) e China (2016) adotaram medidas para aceleração da substituição dessas lâmpadas por fluorescentes, a fim de reduzir o consumo de energia.

Com o passar do tempo, os países foram buscando formas de reduzir ainda mais o consumo de energia, inserindo e promovendo o uso de lâmpadas LED na iluminação pública. Um dos exemplos é a África, cuja política continental direciona a substituição de lâmpadas de querosene por um sistema acoplado de placas voltaicas a lâmpadas de LED (UNEP, 2015). O foco mundial também está direcionado à preocupação com a produção de resíduos gerados pelo descarte de lâmpadas de LED, em que os países incentivam a coleta adequada desses equipamentos, quando inservíveis, pois contêm resíduos eletrônicos e outros componentes que precisam ser

descartados em locais que proporcionam um fluxo separado da fração de lâmpadas que contêm mercúrio, viabilizando economicamente sua recuperação (UNEP, 2017).

A União Europeia foi a primeira a inserir as lâmpadas de LED em regulamentação em nível federal. Elas se encaixam na categoria 3 do Anexo III, obrigando os produtores a encaminharem à reciclar 80% dos produtos pós-consumo colocados no mercado anualmente. É válido salientar que a Europa não adota o sistema de responsabilidade compartilhada como o Brasil, tendo suas leis fundamentadas na obrigação do produtor sobre os cuidados com o ciclo de vida de seus produtos.

O Reino Unido apresenta uma solução própria (*Recolight*), responsável pela realização da logística reversa para lâmpadas que contêm mercúrio e os LEDs, incluindo coleta, segregação e destinação de forma adequada à reciclagem. São mais de 3300 pontos de entrega voluntária em território nacional, que atendem tanto a geradores domésticos como comerciais (RECOLIGHT LIMITED, 2019).

O Canadá, por sua vez, não possui regulamentações federais sobre o descarte de lâmpadas. No entanto cabe destacar a existência de uma empresa de gestão de produtos incorporada federalmente, sem fins lucrativos, que possui um programa de reciclagem inicial em algumas províncias. O *ReGeneration*, sistema especial de reciclagem de resíduos operado pela empresa, é um dos maiores sistemas para coletar e descartar diferentes tipos de lâmpadas no país (KUMAR *et al.*, 2019).

O Brasil vem seguindo a tendência mundial de consumo desses equipamentos e, apesar da aprovação do Acordo Setorial, para a implantação de Sistema de Logística Reversa de Produtos Eletroeletrônicos e seus Componentes, no ano de 2019, o país ainda não possui um sistema de gerenciamento sustentável para essa tipologia de resíduo (MMA, 2019a). As lâmpadas estão inclusas no Acordo Setorial para implantação do Sistema de Logística Reversa de Lâmpadas Fluorescentes, de Vapor de Sódio e Mercúrio e de Luz Mista (MMA, 2015). Esse acordo foi firmado com abrangência nacional e foi assinado, em 2014, porém atendeu apenas 4,6% da meta de recolhimento estabelecida, o que caracteriza a necessidade de melhorias para toda a cadeia (MMA, 2019b). Deve-se destacar que ambos os acordos não apresentam lâmpadas de LED em seu escopo, o que dificulta a tomada de decisões sobre os processos de logística reversa, destinação e disposição final adequada (MMA, 2015; MMA, 2019a). Ainda, ressalta-se que são objetos dos acordos apenas produtos de origem domiciliar, ou seja, descartados por geradores individuais, em suas atividades domésticas, não contemplando grandes geradores.

Em estudo desenvolvido por Forti *et al.* (2020), os autores constataram que 78 países avançaram com relação à legislação que trata especificamente sobre REEE, cobrindo, aproximadamente, 71% da população mundial. Contudo observa-se que as lâmpadas de LED ainda não se apresentam em posição de destaque nas discussões.

Deste modo, o potencial de impacto e o alto valor agregado são duas faces desse mesmo resíduo. Enquanto as placas de circuito impresso, alumínio e os LEDs possuem teor significativo de ouro,

essas também podem apresentar chumbo em sua composição, exigindo cuidados específicos quanto ao seu descarte (LIM *et al.*, 2012).

13.3. Caracterização de resíduos de lâmpadas LED

A caracterização é uma etapa importante para a identificação do potencial econômico das lâmpadas de LED. Carvalho & Xavier (2014) classificam as lâmpadas e grande parte dos REEEs em três frações de materiais: (i) Cerâmicas (geralmente compostas por óxidos refratários); (ii) Plásticos (Polímeros geralmente associados à sua capa); (iii) Metais (integrantes da parte mais valiosa do resíduo).

Os metais representam a parte de maior interesse dessa tipologia de resíduo e, assim como em outros tipos de lâmpadas, os LEDs também são compostos por terras-raras (KUMAR *et al.*, 2019). A Tabela 1 apresenta as concentrações dos elementos metálicos e as médias referentes aos estudos de caracterização desenvolvidos por diversos autores.

A partir dos dados presentes na Tabela 1, pode-se observar a abundância dos elementos alumínio, cobre e ferro, fato que é característico da composição de eletroeletrônicos em geral. Também é válido salientar que grande parte dos dados demonstram um alto desvio-padrão, quando comparados às suas médias, e isso se deve à variedade de marcas e modelos de lâmpadas de LED disponíveis no mercado mundial. Alguns estudos, como o de Cenci *et al.* (2020), foram realizados apenas com lâmpadas tubulares e de bulbo, diferentemente do que foi proposto por Rebello *et al.* (2020), os quais utilizam um lote misto.

Entre os metais preciosos, o ouro e a prata foram identificados em grande parte dos estudos observados, demonstrando que as lâmpadas de LED se apresentam como um resíduo com grande potencial econômico para a recuperação de metais. O cobre também pode se destacar nessa composição, visto que, apesar de apresentar menor valor de mercado, é encontrado em quantidade expressiva nessas lâmpadas.

Tabela 1. Média e desvio-padrão dos estudos de caracterização

Metal (mg/kg)	Concentração média (mg/kg)	Desvio Padrão (mg/kg)
Al	195.544,16	15.300,00
Ag	257,30	0,00

As	46,68	0,00
Au	130,15	0,00
Ba	536,00	1.141,10
Ca	3.750,00	30.971,20
Ce	10,02	0,00
Co	15,00	0,00
Cr	229,73	9,45
Cu	48.030,79	55.250,00
Fe	89.333,25	4.894,44
Ga	66,45	0,00
Gd	3,55	75,07
Hg	0,40	340,85
Ni	890,06	40,00
Pb	1.969,94	1.780,00
Sb	167,77	0,00
Sn	8.554,00	0,00
Ti	2.290,00	0,00
W	1,20	349,30
Y	179,13	4.546,67
Zn	4.507,07	0,00
Al	195.544,16	15.300,00

Fonte: Adaptado de Cenci *et al.* (2020), Oliveira *et al.* (2020), Rebello *et al.* (2020), Kumar *et al.* (2019), Tuenge *et al.* (2013), Lim *et al.* (2012) e Lim *et al.* (2011).

13.4. Recuperação de metais de resíduos de lâmpadas de LED

As metodologias mais utilizadas na recuperação de metais de lâmpadas de LED são baseadas em quatro tipos de processos: físicos, pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e bio-hidrometalúrgicos. Os processos físicos são, muitas vezes, aplicados por serem eficientes na liberação, exposição e separação dos materiais de interesse (CENCI *et al.*, 2020). A desmontagem dos equipamentos seguida de cominuição, em geral, são as primeiras técnicas aplicadas e podem ser executadas de forma manual ou mecanizada. Além de suas vantagens econômicas, com relação à sua simplicidade de operação, os processos de desagregação física possuem baixo uso de energia, baixo investimento inicial e são menos poluentes em comparação a outros métodos.

Os processos pirometalúrgicos se baseiam na decomposição química de materiais orgânicos por aquecimento a altas temperaturas. Nas últimas décadas, tais rotas têm sido usadas como principais métodos para recuperar metais não ferrosos e metais preciosos. Já os processos

hidrometalúrgicos envolvem a técnica de lixiviação, seguida por procedimentos de separação e purificação (ISILDAR, 2016). Entre as suas principais vantagens, essa técnica possibilita a recuperação a partir de sólidos que contêm baixas concentrações do metal de interesse (SWAIN *et al.*, 2015).

Imergindo em novas tecnologias, os processos bio-hidrometalúrgicos se apresentam baseados na capacidade de utilização de microrganismos como bactérias, arqueobactérias e fungos, para extração de metais. Nesses processos, a utilização de microrganismos é baseada, em suas características intrínsecas, as quais produzem, quando em condições ótimas, lixiviantes capazes de solubilizar os metais (YAMANE, 2011).

Tabela 2. Resultados de estudos de recuperação de metais provenientes de lâmpadas de LED

Processo	Referência	Etapas	Eficiência de Recuperação			
			Ga	In		
Piometalúrgico	ZHAN <i>et al.</i> , 2015	Pirólise; Desagregação física; Separação metalúrgica a vácuo	93,5%	95,7%		
	ZHOU <i>et al.</i> , 2019	Processamento mecânico; Pirólise; Lixiviação ácida			Ga 90,4%	
	MAAREFVAND <i>et al.</i> , 2020	Incineração; Lixiviação ácida			Ga 91,4%	
Hidrometalúrgico	GUPTA <i>et al.</i> , 2007b	Extração por solvente; Remoção por meio de solução de HCl			Ga 91,0%	
	GUPTA <i>et al.</i> , 2007a	Extração por solvente; Remoção por meio de solução de HCl			Ga 90,0%	
	MURAKAMI <i>et al.</i> , 2015	Troca iônica com poliamina; Lixiviação; Precipitação			Au 100,0%	
	ANNONI <i>et al.</i> , 2020	Lixiviação; Separação por membrana (ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa)	74,7%	15,7%	98,9%	99,8%
	ZHAN <i>et al.</i> , 2020	Lixiviação em duas etapas (remoção de encapsulamento e recuperação)	99,9%	93,8%	93,1%	85,7%
				Ag	As	Ga
Biometalúrgico	POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2018	Bioliexiviação por contato direto; Bactéria: <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	84,0%	60,0%		Ni 96,0%
	POURHOSSEIN & MOUSAVI, 2019	Processamento mecânico; Bioliexiviação por contato indireto; Bactéria: <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	83,0%	84,0%		Ni 97,0%

Entre os metais caracterizados, o gálio, índio, ouro, cobre, arsênio, prata e níquel apresentam metodologias que possibilitam sua extração, quando provenientes de lâmpadas de LED,

demonstrando majoritariamente, eficiência de recuperação acima de 90,0%, o que demonstra potencial econômico a ser explorado.

13.5. Conclusões

Mesmo com a evolução das leis federais que abrangem eletroeletrônicos, ainda são muito recentes as legislações sobre lâmpadas de LED, ao redor do mundo e, principalmente, no Brasil. Sendo assim, deve-se enquadrar essa tipologia de resíduo, no arcabouço legal nacional, para que sua logística reversa e destinação final adequada sejam realizadas de forma a acompanhar sua penetração no mercado de iluminação.

Um dos meios de estabelecer os melhores mecanismos de fechamento do ciclo de logística reversa de lâmpadas de LED é por meio de sua caracterização, a qual possibilita entender sua composição. Ao observar apenas sua caracterização metálica, as lâmpadas de LED se apresentam promissoras com relação à reciclagem, pois são compostas por metais como ouro, prata, cobre, estranho e terras raras. Além dos metais preciosos, deve-se atentar também com relação à sua periculosidade, pois podem conter chumbo e arsênio.

A recuperação de metais ainda se mostra em estágio inicial, em razão de seu desenvolvimento apenas em laboratório e da inexistência de estudos em escalas piloto e industriais. Adicionalmente, mesmo que as pesquisas ainda se apresentem demasiadamente escassas, grande parte dos estudos demonstraram eficiência maior que 90% na extração de metais como gálio, índio, ouro, cobre, arsênio, prata e níquel dessa fonte luminosa.

Entre os metais estudados, o ouro se apresentou como o elemento com maior impacto, na geração de renda advinda da extração de lâmpadas de LED, seguido do alumínio, cobre, prata e estanho que sozinhos representaram 98,35% do valor econômico da recuperação desse resíduo. Diante disso, é possível inferir que o aproveitamento das lâmpadas de LED pelo mecanismo de reciclagem pode impactar mundialmente tanto econômica como ambientalmente.

Referências

ANNONI, R., 2020. Resíduos de lâmpadas de led: desmonte, caracterização e desempenho da integração de lixiviação, precipitação e ultrafiltração na recuperação de metais. Tese de Doutorado, Escola de Engenharia da UFMG.

ANNONI, R., LANGE, L. C., AMARAL, M. C. S., SILVA, A. M., ASSUNÇÃO, M. C., FRANCO, M. B., SOUZA, W., 2020. Light emitting diode waste: potential of metals concentration and acid reuse via the integration of leaching and membrane processes. *Journal of Cleaner Production* 246, 1-11.

- CARVALHO, C.M.B., XAVIER, L.H., 2014. Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- CENCI, M. P., BERTO, F. C. D., SCHNEIDER, E. L., VEIT, H. M., 2020. Assessment of LED lamps components and materials for a recycling perspective. *Waste Management* 107, 285-293.
- COMMODITY CLOSING PRICES, 2019. Disponível em: <https://www.mining.com/markets/>. Acesso em: 31. Ago. 2020.
- CUCCHIELLA, F., D'ADAMO, I., KOH, S.C.L., ROSA, P., 2015. Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 51, 263-272.
- DOS SANTOS, E. C. A., SILVEIRA, T. A., COLLING, A. V., MORAES, C. A. M., BREHM, F. A., 2020. Recycling Processes for the Recovery of Metal from E-waste of the LED Industry. *E-waste Recycling and Management*, 159-177.
- FORTI, V., BALDÉ, C., KUEHR, R., BEL, G., 2020. The Global E-waste Monitor 2020. Quantities, flows, and the circular economy potential.
- GIL-DE-CASTRO, A., RÖNNBERG, S.K., BOLLEN, M.H.J., 2017. Light intensity variation (flicker) and harmonic emission related to LED lamps. *Electric Power Systems Research* 146, 107-114.
- GUPTA, B., MUDHAR, N., BEGUM I, Z., SINGH, I., 2007. Extraction and recovery of Ga(III) from waste material using Cyanex 923. *Hydrometallurgy J.* 87, 18-26.
- GUPTA, B., MUDHAR, N., SINGH, I., 2007. Separations and recovery of indium and gallium using bis (2,4,4-trimethylpentyl) phosphinic acid (Cyanex 272). *Separation Purification Technology Journal* 57, 294-303.
- ISILDAR, A., RENE, E.R., HULLEBUSCH, E.D.V., LENS, P.N.L., 2017. Electronic waste as a secondary source of critical metals: Management and recovery Technologies. *Resources, Conservation & Recycling* 135, 296-312.
- KUMAR, A., KUPPUSAMY, V. K., HOLUSZKO, M., SONG, S., LOSCHIAVO, A., 2019. LED lamps waste in Canada: generation and characterization. *Resources, Conservation and Recycling* 146, 329-336.
- LIM, S-R., KANG, D., OGUNSEITAN, O. A., SCHOENUNG, J. M., 2011. Potential Environmental Impacts of Light-Emitting Diodes (LEDs): metallic resources, toxicity, and hazardous waste classification. *Environmental Science & Technology* 45, n. 1, 320-327.
- LIM, S-R., KANG, D., OGUNSEITAN, O. A., SCHOENUNG, J. M., 2012. Potential Environmental Impacts from the Metals in Incandescent, Compact Fluorescent Lamp (CFL), and Light-Emitting Diode (LED) Bulbs. *Environmental Science & Technology* 47, n. 2, 1040-1047.
- MAAREFVAND, M., SHEIBANI, S., RASHCHI, F., 2020. Recovery of gallium from waste LEDs by oxidation and subsequent leaching. *Hydrometallurgy J.* 191, 105230.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2015. Acordo setorial de lâmpadas de vapor de sódio e mercúrio e de luz mista. Disponível em <http://www.sinir.gov.br/web/guest/acordo-setorial->

de-lampadasfluorescentes-de-vapor-de-sodio-e-mercurio-e-de-luz-mista. Acesso em: 06. Jun. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2019a. Acordo Setorial de Logística Reversa de Eletroeletrônicos Disponível em <https://www.mma.gov.br/images/Acordo%20Setorial/Acordo%20Setorial%20-%20Eletroeletr%C3%B4nicos.pdf> Acesso em: 06. Jun. 2020.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – MMA, 2019b. Reciclus: Relatório Anual de Atividades e Resultados 2019 (Partes 1 e 2), ano-base 2018. Disponível em: <https://sinir.gov.br/images/sinir/Imagens2020/1---Relatorio-Final-Lampadas-2019---part-1.pdf> e <https://sinir.gov.br/images/sinir/Imagens2020/2---Relatorio-Final-Lampadas-2019---part-2.pdf>. Acesso em: 7. Set. 2020.

MURAKAMI, H., NISHIHAMA, S., YOSHIKAWA, K., 2015. Separation and recovery of gold from waste led using ion exchange method. *Hydrometallurgy* 157, 194-198.

OLIVEIRA, R. P., BOTELHO JUNIOR, A. B., ESPINOSA, D. C. R., 2020. Characterization of Wasted LEDs from Tubular Lamps Focused on Recycling Process by Hydrometallurgy. *Energy Technology 2020: Recycling, Carbon Dioxide Management, and Other Technologies*, 317-325.

POURHOSSEIN, F., MOUSAVI, S. M., 2019. A novel step-wise indirect bioleaching using biogenic ferric agent for enhancement recovery of valuable metals from waste light emitting diode (WLED). *Journal of Hazardous Materials* 378, 1-12.

POURHOSSEIN, F., MOUSAVI, S. M., 2018. Enhancement of copper, nickel, and gallium recovery from LED waste by adaptation of *Acidithiobacillus ferrooxidans*. *Waste Management* 79, 98-108.

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE – BGR, 2019. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources. Disponível em: https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/Preisliste/pm_19_12.pdf Acesso em: 31/08/2020.

QIU, Y., SUH, S., 2019. Economic feasibility of recycling rare earth oxides from end-of-life lighting technologies. *Resources, Conservation and Recycling* 150, 1-9.

RARE EARTH PRICES IN FEBRUARY, 2020. Institute of Rare Earths and Metals. Disponível em: <https://en.institut-seltene-erden.de/rare-earth-prices-in-february-2020/> Acesso em: 31. Ago. 2020.

REBELLO, R. Z., LIMA, M. T. W. D. C., YAMANE, L. H., SIMAN, R. R., 2020. Characterization of end-of-life LED lamps for the recovery of precious metals and rare earth elements. *Resources, Conservation & Recycling* 153, 1-7.

RECOLIGHT LIMITED, 2019. How we recycle: The Recoligh Recycling Process. Info Sheet - C1, WEE/MP3838PR/SC. Disponível em <http://www.recolight.co.uk/wp-content/uploads/C1_How-We-Recycle_PDF-2019-1.pdf> Acesso em: 20. Out. 2020.

SWAIN, B., MISHRA, C., KANG, L., PARK, K. S., LEE, C. G., HONG, H. S., PARK, J. J., 2015. Recycling of metal-organic chemical vapor deposition waste of GaN based power device and LED industry by acidic leaching: Process optimization and kinetics study. *Power Sources J.*, 281, 265-271.

TUENGE, J.R., HOLLOMON, B., DILLON, H.E., SNOWDEN-SWAN, L.J, 2013. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products. Part 3: LED Environmental Testing, Richland, WA (United States).

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP, 2015. Developing effective off-grid lighting policy guidance note for governments in Africa. Disponível em: <https://united4efficiency.org/wp-content/uploads/2016/09/Guidance-noteOGL_en.lighten_English_2016-01-08.pdf>. Acesso em: 8. Jun. 2020.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME – UNEP, 2017. Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient Lighting. Disponível em: <<https://united4efficiency.org/resources/accelerating-global-adoption-energy-efficientlighting/>>. Acesso em: 27. Jun. 2020

União Europeia – EU, 2012. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 04 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE).

YAMANE, L. H., DE MORAES, V. T., ESPINOSA, D. C. R., TENÓRIO, J. A. S., 2011. Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. Waste Management 31, 2553-2558.

ZHAN, L., WANG, Z., ZHANG, Y., XU, Z., 2020. Recycling of metals (Ga, In, As and Ag) from waste light-emitting diodes in sub/supercritical ethanol. Resources, Conservation and Recycling 155, 1-8.

ZHAN, L., XIA, F., YE, Q., XIANG, X., XIE, B., 2015. Novel recycle technology for recovering rare metals (Ga, In) from waste light-emitting diodes. Journal of Hazardous Materials 299, 388-394.

ZHOU, J., ZHU, N., LIU, H., WU, P., ZHANG, X., ZHONG, Z., 2019. Recovery of gallium from waste light emitting diodes by oxalic acidic leaching. Resources, Conservation & Recycling 146, 366-372.

PARTE III

ESTUDOS DE CASO



VERTAS



A Vertas começou a operar, em 2009 e atua, em todo o território nacional, em projetos, serviços e soluções, para o gerenciamento e tratamento de resíduos tecnológicos, descomissionamento, manufatura reversa e reciclagem.

A Vertas é uma empresa inovadora, focada não somente em atender às metas de produtividade e às demandas da legislação vigente, mas sempre com uma visão no futuro, nas novas tecnologias e oportunidades. A empresa investe em pesquisa e inovação tecnológica, por meio de parcerias e apoios, em busca de equipamentos e tecnologias que otimizem os processos e minimizem os impactos ambientais. O compromisso da Vertas com o desenvolvimento sustentável e a preservação do meio ambiente é ressaltado, em sua participação no Pacto Global, nos esforços pela neutralização de carbono e por práticas da economia circular, como projetos de *upcycling* e meta de resíduo zero.

Atuando de forma pioneira na América Latina, promove a recuperação de materiais, por meio de processo a seco, ou seja, sem consumo de solventes ou água em seu processo. Desta forma, não são gerados efluentes ou requer o descarte de resíduos líquidos. Possui um sistema moderno de filtragem das emissões do processo com vista ao atendimento aos requisitos legais. Destaca-se ainda que o equipamento para a recuperação é qualificado como multimatéria, com capacidade para processamento e separação de diferentes tipos de materiais como alumínio, plástico, cobre, etc.



Figura 1. Visão aérea da empresa e detalhes do processo de recuperação de materiais.

A empresa conta com uma equipe de 85 colaboradores diretos e dispõe de mais de 5.000 metros quadrados de área, distribuídos em galpões logísticos. Para o atendimento customizado, em todo território nacional, a empresa opera com postos logísticos homologados, divididos em 27 pontos de coleta e 10 unidades de transbordos.

O processamento é realizado por equipamento totalmente automatizado para processamento e separação de metais, polímeros e metais ferrosos. O equipamento utiliza o processo a seco, evitando o consumo de água e a geração de efluentes líquidos, o que minimiza o risco de

poluição do solo e do lençol freático. Os produtos gerados no processo são mais puros, pois não têm contato com a água. O equipamento é dotado de filtros eficientes que impedem a emissão de particulados para a atmosfera e de sua chaminé sai apenas ar quente. Outro benefício desse sistema é a melhor qualidade dos produtos gerados, mais puros por não terem contato com a água.

A empresa é licenciada pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), certificada ISO14001, ISO 9001 e ISO 45001, possui o CTF – (Cadastro Técnico Federal – Ibama), nas modalidades AIDA e APP, comprovando a qualidade de seus processos de gestão administrativa e gestão ambiental.

O sistema de gestão integrado cadastra os resíduos na entrada e realiza o acompanhamento até o processamento final, garantindo segurança e rastreabilidade.

A Vertas integra a Rede Brasil do Pacto Global, iniciativa da ONU, que orienta ações empresariais alinhadas aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Além disso, a Vertas mantém duas RPPNs (Reservas Particulares de Patrimônio Naturais) e programas de reflorestamento na fazenda Guapiara, no município de Aiuruoca, em Minas Gerais, contribuindo na neutralização do carbono relacionado às atividades da empresa. As reservas são abertas à visitação.

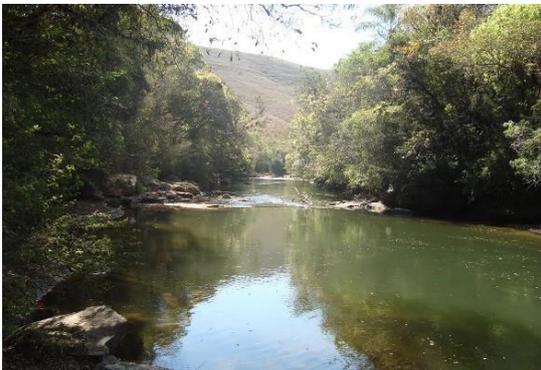


Figura 2. Imagens das áreas das RPPNs mantidas pela Vertas em Minas Gerais.

A Vertas está continuamente em busca de soluções mais eficientes, para a otimização da reciclagem e redução dos rejeitos, visando à meta máxima do resíduo zero. Para atingir a esse objetivo, a empresa realiza parcerias com pesquisadores e outras indústrias, apoiando projetos de pesquisa e a formação de novos pesquisadores por intermédio de bolsas de estudo.



Figura 3. Esquema ilustrativo da proposta da Vertas.

A empresa Vertas totaliza um volume anual de 4.000 toneladas processadas. Seus processos de reciclagem produzem matérias-primas com origem certificada, em especial, metais não ferrosos, como alumínio e cobre para uso industrial.

A proposta da empresa está alinhada com as metas de desenvolvimento sustentável da ONU e atende a padrões internacionais de sustentabilidade na gestão de resíduos eletroeletrônicos. Uma das poucas empresas nacionais que fornece sistema de rastreabilidade dos materiais gerenciados de forma integrada com descaracterização de marcas e dados.

Entre as etapas do gerenciamento integrado estão:

- Definição de dispositivos de apoio logístico;
- Implantação de sistema de gestão de resíduos;
- Coleta com emissão do manifesto de transporte de resíduos;
- Integração logística e transporte dos resíduos;
- Descaracterização e proteção de marca;
- Transformação dos resíduos em matéria-prima;
- Encaminhamento correto dos resíduos não recicláveis;
- Emissão de relatório com balanço de massa;
- Emissão de certificado de destinação final.

A Vertas atua em conformidade a princípios da economia circular, como circularidade e resíduo zero. A empresa desenvolveu a tecnologia Revert Way (RW), que transforma resíduos do processo que iriam para o aterro, em placas com aplicações diversas, como o fechamento de bobinas. Essa tecnologia permite o upcycling (reutilização criativa), processo que transforma subprodutos e resíduos em novas matérias-primas ou novos produtos, recuperando o valor e mantendo a circularidade. A empresa tem como foco o aproveitamento cada vez mais completo dos materiais, visando à meta máxima do resíduo zero. Um diferencial da empresa é a estruturação de um sistema informatizado para o gerenciamento do processamento dos resíduos. A partir do sistema, é possível ao cliente que contrata o serviço acompanhar as etapas de processamento, bem como identificar o nível de mitigação dos impactos considerando a rastreabilidade do fluxo de materiais e a redução de emissões ao longo do processo.

GM&CLog



A GM&C Log foi fundada, em 2002, localizada na cidade de São José dos Campos com infraestrutura em mais de 6,2 mil metros quadrados, com 82 colaboradores diretos e 100 colaboradores indiretos, atuando nos segmentos: automotivo, eletroeletrônico, telecomunicações, energia solar, farmacêutico e aeroespacial. Em 2020, foram processadas 4,3 mil toneladas de materiais. A empresa possui seus processos baseados nas melhores práticas e nos requisitos Resolução Conama nº 401, da Política Nacional de Resíduos Sólidos e a norma ABNT NBR 16.156:2013.

A empresa realiza o gerenciamento de mais de 15 mil pontos de coleta e recebimento. Possui capacidade de processamento estimada em 30 mil toneladas de equipamentos eletroeletrônicos anualmente. O maior volume gerenciado é proveniente prioritariamente das regiões Sul e Sudeste do Brasil, com destaque para São Paulo, Minas Gerais e Curitiba, com 27 hubs nas principais capitais. Atua em diferentes segmentos de equipamentos eletroeletrônicos e investe em pesquisa e inovação. Possui logística com frota própria e especializada.



O sistema informatizado permite transparência, conectividade em tempo real com clientes e parceiros, bem como o balanço de massa e rastreabilidade da destinação dos resíduos, monitoramento de todas as etapas dos processos e de indicadores de desempenho. A Figura 1 apresenta os fluxos de manufatura reversa e rastreabilidade na empresa.

Entre os parceiros, podem-se relacionar a Umicore, Gerdau, Nexa, FBM, entre outras 60 empresas homologadas pela área ambiental da empresa. Atua com ferramentas de qualidade, na busca incondicional da excelência operacional ou melhoria contínua, por meio do JIT, Kaizen, 6 Sigma e outros. A Figura 2 apresenta a integração dos sistemas de gerenciamento da GM&CLog.

O sistema GM&CLOG 4.0 é uma plataforma que se integra a vários outros sistemas, em que o cliente pode acompanhar todos os números e indicadores das etapas da logística reversa e reciclagem dos resíduos. A GM&C é pioneira nesse segmento no Brasil e gerencia as etapas de agendamento, coleta, armazenagem, triagem, manufatura reversa, extração de materiais (plásticos e metais), encaminhamento para parceiros de refino ou de transformação. Em seu sistema, o cliente pode consultar o certificado de manufatura reversa, laudo fotográfico de todo o processo, comprovando a destruição e certificado de destinação final junto aos recicladores finais.

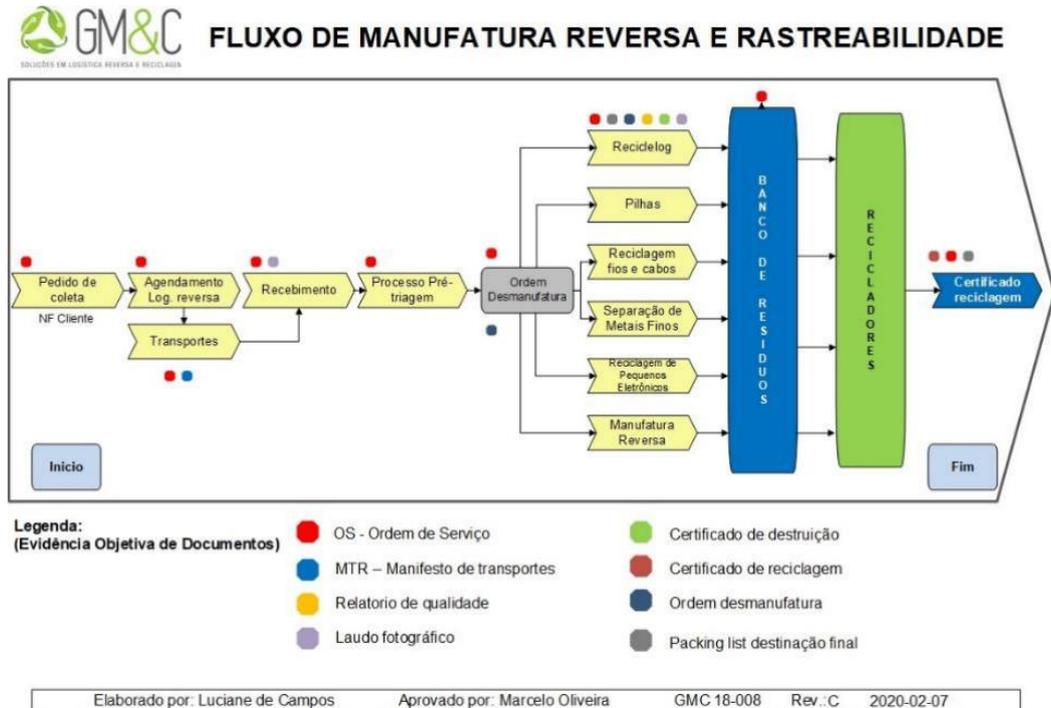


Figura 1. Fluxograma de manufatura reversa e rastreabilidade.

A empresa é certificada pela ISO 14.001, ISO 45.001 e em fase de Certificação da R2. Um dos segmentos pioneiros da empresa é o segmento de logística reversa de pilhas pós-consumo, o que a torna líder no segmento no Brasil. Em maio de 2021, a empresa já havia gerenciado mais de 1,8 (hum milhão e oitocentos quilos) de pilhas pós-consumo.

A partir do Balanço Ecológico de 2020, ilustrado na Figura 2, a empresa informa que seus processos contribuíram para a manutenção da qualidade ambiental, a partir de indicadores que consideram aspectos relacionados ao impacto da indústria produtora e extração de recursos. Desta forma, o balanço propõe que 8.150 árvores deixaram de ser cortadas, 4 bilhões de kWh foram economizados, 24 milhões de litros de água foram preservados e 407 toneladas de CO2 deixaram de ser emitidos.

A Empresa Líder no Brasil em Logística Reversa e Reciclagem de Eletrônicos de pequeno e médio porte ou das linhas verde, marrom e azul. Em sua planta de reciclagem, possui diversas tecnologias na separação de metais ou que lhes confere a maior da América do Sul.

A empresa informa em seu site os pontos de recebimento de equipamentos pós-consumo disponíveis aos consumidores. São os chamados pontos de logística passiva, como mostra a Figura 3 e totalizam 6.276 pontos em maio de 2021.



Figura 2. Balanço Ecológico de 2020 da GM&CLog

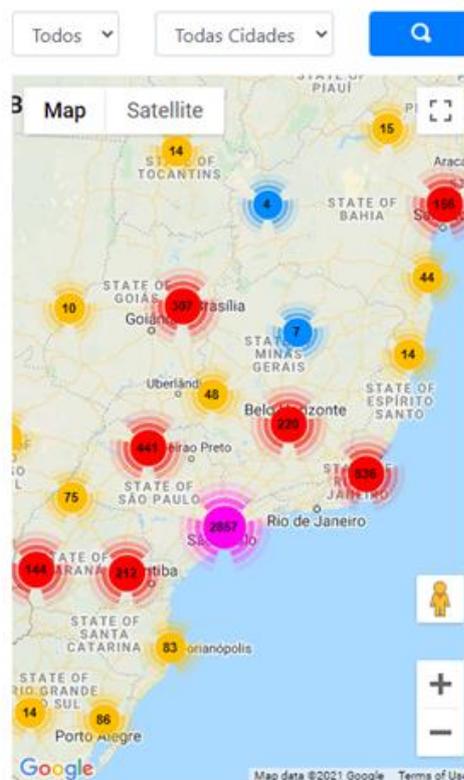


Figura 3. Pontos de logística passiva da GM&CLog. Fonte: <https://sistema.gmclog.com.br/info/green>

É uma das poucas empresas no país que conta com soluções tecnológicas para a separação de metais ferrosos e não ferrosos. Soluções essas desenvolvidas em parceria com Empresas Alemã, Italiana e Brasileira, como ilustra a Figura 4.



Figura 4. Processos de separação de metais na GM&CLog

INDÚSTRIA FOX



A Indústria Fox foi fundada, em **2009**, com a missão de operar a primeira fábrica de produção reversa de refrigeradores na América do Sul com tratamento dos gases HCFCs – substâncias reguladas pelo protocolo de Montreal. Como legado, a empresa desenvolveu a “*Swiss Charter*”, um guia de boas práticas sustentáveis para nossas ações. O início das atividades no Brasil se deu por meio de recursos da Fundação Internacional *Fair Recycling* e da Agência Suíça para Cooperação Econômica. A empresa atua nas áreas de remanufatura, reciclagem e eficiência energética, com foco em equipamentos de linha branca (como geladeiras, aparelhos de ar-condicionado, fogões, microondas e máquinas de lavar, entre outros), demais equipamentos eletroeletrônicos não refrigerados, lâmpadas e reatores.

Em setembro de 2010, a primeira unidade fabril foi inaugurada, em Cabreúva-SP, com foco na produção de matéria-prima secundária e na proteção climática, por meio da eliminação de emissões de gases de efeito estufa, decorrentes da reciclagem inadequada de aparelhos de refrigeração. Para obter refrigeradores antigos, a empresa começou, em 2011, a se especializar em projetos de troca de refrigeradores dentro do âmbito do programa de eficiência energética PEE da ANEEL no setor elétrico. Adquiriu frota própria e começou a desenvolver expertise na gestão de projetos para empresas de energia e serviços de engenharia, oferecendo serviços de preparo de diagnósticos energéticos e medição e verificação de resultados e iniciou atividades de distribuição, logística reversa e coleta de eletrodomésticos com recursos próprios.

Com a crise econômica no Brasil, em 2016, a empresa consolidou seus processos, colocando em operação um processo de flotação para a reciclagem de plásticos e um novo galpão novo para a armazenagem de materiais foi disponibilizado. Em 2017, a Indústria Fox conseguiu consolidar programas próprios de eficiência energética, em chamadas públicas, baseado no mecanismo de bônus, nos quais o consumidor final pode adquirir um equipamento novo com subsídio, entregando seu equipamento obsoleto para ser destinado à reciclagem. No ano seguinte, a empresa ampliou sua atuação nos processos de reaproveitamento de materiais e produtos no mercado B2B, com a evolução estratégica do conceito de economia circular, para o conceito de reengenharia de qualidade e tecnologia, visando à minimização de custos.

A base operacional da Indústria Fox conta com infraestrutura fabril, galpões para armazenagem, logística e área administrativa, em um total de 425000 m², com 140 funcionários totais, sendo que 50 trabalham diretamente com resíduos eletroeletrônicos (formulário) e está concentrada no município de Cabreúva, no interior paulista. A localização estratégica facilita o acesso às principais rodovias do estado de São Paulo e saídas para outros estados brasileiros. O modelo de negócio adotado pela Fox conta com frota própria (veículos que suportam até 17 toneladas de carga) para viabilizar o atendimento de retirada pontual de produtos, ou ainda, coleta de forma contínua, em projetos para empresas (ou *business to business*, B2B) e/ou de eficiência energética com concessionárias de energia, possuindo abrangência nacional.

A remanufatura na Indústria Fox conta com processos de reoperação de eletrodomésticos, especialmente os de linha branca. Tais procedimentos se valem nas condições de retorno, após arrependimento do cliente, ou seja, nas situações de compra web e devolução em garantia (pós-consumo), de acordo com diretrizes de qualidade e segurança do fabricante. Inicialmente, são realizadas análises técnicas, para identificar peças e componentes mais suscetíveis à fadiga, bem como garantir a qualidade no processo de fabricação dos produtos remanufaturados. Essa etapa consiste ainda da montagem dos equipamentos, treinamento com assistências técnicas para reforço sobre uso correto do produto, além de contatos frequentes com fornecedores de peças, de forma a minimizar os custos com trocas desnecessárias, logística, recuperação da imagem do produto. Ademais, a empresa performa o reuso, por meio da recuperação de equipamentos de refrigeração comercial, considerando total descaracterização da marca de propriedade da empresa/indústria de bebidas, o que isenta a proprietária da marca de qualquer responsabilidade pela explícita comunicação de “reoperado” do equipamento, além de reduzir o custo logístico e de descarte para o contratante.

Os processos de reciclagem industrial executados pela Indústria Fox são certificados pelas normas ABNT 15.833 e 16.156 e visam auxiliar as empresas contratantes, no cumprimento das metas de destinação, previstas no acordo setorial de eletroeletrônicos, por meio de soluções sob medida, com desenho personalizado de operações, além de aconselhamento acerca do acordo setorial.

Nos processos de reciclagem, a Fox, com tecnologia pioneira e única na América do Sul, recebe e trata adequadamente os clorofluorcarbonos (CFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) e hidrofúorcarbonos (HFCs), presentes em equipamentos de refrigeração domésticos e comerciais (refrigeradores, freezers, condicionadores de ar, balcões refrigerados, equipamentos automotivos, máquinas industriais, entre outros). A importância desse serviço se deve a quesitos de ordem ambiental, pelo seu alto potencial de aquecimento global (Global warming potential, GWP) e legal, pelo Brasil ser um dos países signatários do Protocolo de Montreal e tem por obrigação controlar, destinar corretamente e reduzir a utilização das substâncias destruidoras da camada de ozônio (SDOs). Nesse aspecto, a empresa conta com serviços de auxílio no processo de licenciamento (CADRI e parecer técnico) e fornece comprovação com Certificado Fox de destinação final para seus contratantes.

Com base na norma ABNT 15.833/2010, a reciclagem é realizada três fases:

- **Fase 1:** Captação de óleo e gás do circuito de refrigeração;
- **Fase 2:** Captação dos gases presentes no isolamento térmico, com trituração total do equipamento em ambiente hermético;
- **Fase 3:** Destruição seguida de transformação dos gases coletados nas fases 1 e 2;

Demais equipamentos eletroeletrônicos (não refrigerados)

De acordo com a norma ABNT 16.156:2013 e a Lei 12.305:2010, bem como instruções técnicas de trabalho específicas, que consistem em etapas manuais e mecanizadas para desmontagem, trituração e descaracterização, a reciclagem dessa categoria de resíduos segue três principais etapas:

- Registro do material;
- Triagem e classificação do material: os produtos sem refrigeração são inspecionados previamente para a detecção de componentes nocivos e/ou não tratáveis na planta, em Cabreúva, mas que terão a destinação adequada e legal;
- Aplicação da Instrução técnica de trabalho e o processo correspondente conforme o tipo de material: caso os produtos não apresentem nenhum resíduo contaminante, seguirão às etapas de desmontagem manual e mecanizadas para descaracterização.

Lâmpadas e Reatores

As lâmpadas e reatores recolhidos em campo e/ou de projetos de eficiência energética são direcionadas para a planta de Cabreúva, em que são descarregados, classificados por tipo (triagem) e armazenados para posterior tratamento in loco ou externo. Dois tipos de lâmpadas merecem destaque:

- **Lâmpadas incandescentes:** trituração em ambiente fechado, com sucção de poeira do processo. Após a trituração, são removidas as partes ferrosas das lâmpadas por um separador magnético permanente e com direcionamento às caçambas de ferro. Os cacos de vidro são levados por esteiras rolantes até a estação de big bags, onde serão colocados em big bags disponibilizados para retirada.
- **Lâmpadas fluorescentes:** são separadas para envio e tratamento ambientalmente correto em empresa parceira e homologada pela Indústria Fox.

A Indústria Fox desenvolve, ainda, projetos especiais, para a coleta de resíduos, em parceria com instituições de ensino, rede varejista e fabricantes para a captação espontânea de resíduos eletroeletrônicos com foco na Política Nacional Resíduos Sólidos (PNRS). Para tal, a empresa oferece os serviços de: entendimento das necessidades, logística reversa, montagem de postos de coleta, reciclagem conforme normas ABNT e certificados de destinação.

As ações elaboradas pela Fox com fins de eficiência energética visam impactar desde o público residencial, os consumidores com baixo poder aquisitivo até as concessionárias de energia. O Bônus residencial é uma modalidade de projeto que consiste na troca de eletrodomésticos ineficientes por modelos eficientes com bônus da concessionária de energia, sendo voltado ao público residencial da concessionária de energia. Para que a unidade consumidora seja elegível, precisa estar com a conta de energia regularmente paga, possuir domicílio na praça de abrangência do projeto e ter um equipamento ineficiente da mesma categoria para troca. Nesse caso, se o projeto for direcionado para refrigeradores, o consumidor deverá ter equipamento ineficiente em funcionamento para garantir o bônus no ato da entrega do novo. Os benefícios aos consumidores e à concessionária são refletidos na diminuição do consumo de energia, destinação ambientalmente correta do equipamento ineficiente, economia na compra do produto novo (bônus da concessionária), e no cumprimento da determinação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).

Aos consumidores com baixo poder aquisitivo, a Indústria Fox desenvolveu os projetos Turn Key modalidade baixa renda, que compreendem desde compra de produtos novos mais eficientes com selo do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) até a reciclagem dos produtos ineficientes retirados nas residências dos consumidores pela prestadora de

serviço. Como vantagens, são listadas a redução da conta de energia, a destinação ambientalmente correta do equipamento ineficiente, a centralização do projeto em apenas uma empresa, o atendimento à PNRS e o cumprimento da determinação da ANEEL.

A Fox realiza, ainda, campanhas de Medição & Verificação (M&V), com modelagem estatística, medições pré e pós-indicadas no projeto, de acordo com as diretrizes consoantes ao Protocolo Internacional de Medição e Verificação de Performance (PIMVP), elaboradas pela *Efficiency Valuation Organization* (EVO, 2012), ao Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE) e ao “Guia de M&V para o PEE Regulado pela ANEEL”. Assim, a concessionária de energia pode comprovar a economia de energia obtida no projeto e cumprir a determinação da ANEEL.

Os Diagnósticos energéticos são estudos dentro do portfólio de atividades da Indústria Fox que têm por objetivo determinar a viabilidade da eficiência do escopo proposto (economia de energia x investimento), por meio de levantamento de informações e medições, embasando o investimento a ser empregado pela concessionária de energia, com fins de cumprimento da determinação da ANEEL.

A empresa realiza, da mesma forma, eventos para trazer soluções customizadas relacionadas à eficiência energética, durante as ações pontuais, que têm como base o entretenimento para envolver o cliente, a família e a comunidade local. Muitos são os exemplos de atividades desenvolvidas por esse tipo de serviço, como o cadastro de consumidores, para participarem de sorteio e/ou elegibilidade à troca de eletrodomésticos e lâmpadas, a atualização da base de dados da concessionária para ações de comunicação e futuros projetos de eficiência energética, a exposição de dicas sobre o uso racional de energia, a apresentação de novos projetos para redução de energia, tais quais a doação de resíduos de embalagens e/ou eletrodomésticos para ter descontos na conta de energia, além de aproximar a comunidade da concessionária. Nessa mesma linha de atividades, são desenvolvidos projetos educacionais para disseminar conceitos sobre o uso racional de energia elétrica para adultos e crianças de forma lúdica e envolvente, por meio palestras, jogos, competições escolares e, quando possível, utilização da UME – Unidade Móvel Eficiente para que o público tenha contato com experimentos que demonstram o uso de energia elétrica nas residências e os impactos.

Desde o início das operações na Indústria Fox até o presente momento, os serviços prestados correspondem a um total de 850.000 equipamentos reciclados, 400.000 residências eficientizadas, 170GWh de energia economizada e 600.000t de CO₂ tratado nos processos de reciclagem e descontaminação. Somente em 2019, a empresa alcançou a marca de de 4400 t processadas em 2019.

Além disso, a empresa busca aproximação e parceria com diferentes stakeholders, como a academia, fabricantes de eletroeletrônicos, distribuidoras de energia, associações e entidades de classe, indústria e comércio, entre outros. Dessa forma, a Fox reforça a colaboração com diversas áreas para a melhoria contínua dos seus serviços.

TRAMPPPO



A Tramppo, fundada em 2008, atua no mercado de reciclagem com foco no serviço de coleta, transporte e destinação final de lâmpadas. Localizada em Osasco, em uma área de 1.600 m², processa vidro, pó fosfórico, plástico, placa de circuito impresso e alumínio provenientes de diferentes fontes luminosas. Atualmente conta com a colaboração de 15 funcionários e processa 350 toneladas ao ano, quantitativo relativo a, aproximadamente, 1.400.000 lâmpadas. A área de atuação da empresa está concentrada na região Sudeste, principalmente, nos estados de São Paulo e Rio de Janeiro.

A missão da Tramppo é prestar serviços de tratamento e destinação de lâmpadas, oferecendo a melhor gestão e tecnologia, baseados nos princípios da sustentabilidade. Partindo desse pressuposto, a empresa foi estabelecida no CIETEC (Centro de Inovação, Empreendedorismo e Tecnologia), inserido na Universidade São Paulo, no ano de 2003. Teve sua licença de operação concedida, em 2007 e iniciou suas atividades no mercado, em 2008, em que se estabeleceu prestando seus serviços para grandes instituições, como o Hospital Israelita Albert Einstein, a Companhia Paulista de Trens Metropolitanos (CPTM) e o Metrô de São Paulo.

Posteriormente a empresa mudou suas instalações para Cotia (SP), para que pudesse escalar seu crescimento e hoje está localizada, em Osasco, desde o ano de 2015. Com a crescente demanda, foram comprados equipamentos da Suécia e houve também a instalação de novas máquinas de fragmentação produzidas pela própria empresa, atendendo, além dos clientes comerciais, a gestora do principal programa brasileiro de logística reversa de lâmpadas, realizado pela empresa gestora Reciclus.

No ano de 2018, em parceria com o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a Tramppo recebeu apoio financeiro da Embrapii para desenvolver tecnologia de rota de reciclagem para lâmpadas de LED. O projeto de pesquisa foi coordenado pelo IPT, por meio do Centro de Tecnologia em Metalurgia e Material (CTMM), cujo objeto foi o “Desenvolvimento de Rota Tecnológica de Separação de Materiais Recicláveis Presentes em Lâmpadas de LED”, sendo finalizado, em 2019, com a primeira patente (BR 10 2019 026715 1) da América Latina com a finalidade de reaproveitamento dessa tipologia de resíduo.

A partir do fomento a iniciativas de pesquisa e inovação presentes na empresa, também é possível visualizar em sua cultura a necessidade de transição econômica de um modelo linear para o circular. A Tramppo promete ao cliente a adoção de um processo de separação de elementos seguros e limpos, incorporando-os na cadeia de insumos de outras indústrias, realizando suas operações de maneira sustentável. Além disso, vem desenvolvendo tecnologias que visam inserir novos produtos obsoletos na cadeia de reaproveitamento, investindo atualmente na reciclagem de lâmpadas de LED, aporte que condiz com sua visão de ser a melhor empresa em gestão, tratamento e destinação de lâmpadas, contribuindo para o desenvolvimento sustentável.

Atualmente, apesar de ser uma das poucas empresas que atua no segmento, apresenta processo bastante robusto para o tratamento de lâmpadas fluorescentes, porém vem adotando novas

tecnologias para atender ao mercado de logística reversa de lâmpadas de LED. O segmento é regulamentado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos desde 2010 e conta com acordo setorial específico que é operacionalizado por meio da empresa gestora Reciclus.

O fluxo de produção se inicia na área de recebimento, cujas lâmpadas ficam estocadas aguardando início do processo de Separação e Contagem. Elas são identificadas por nome do cliente e número do pedido de venda, o qual será rastreado até o faturamento e emissão da nota fiscal. Posteriormente, na sala de separação e contagem, é realizada a separação e seleção das lâmpadas, de acordo com tipo, tamanho, formato, se está inteira ou quebrada e assim são segregadas as lâmpadas de LED das fluorescentes (Figura 1).

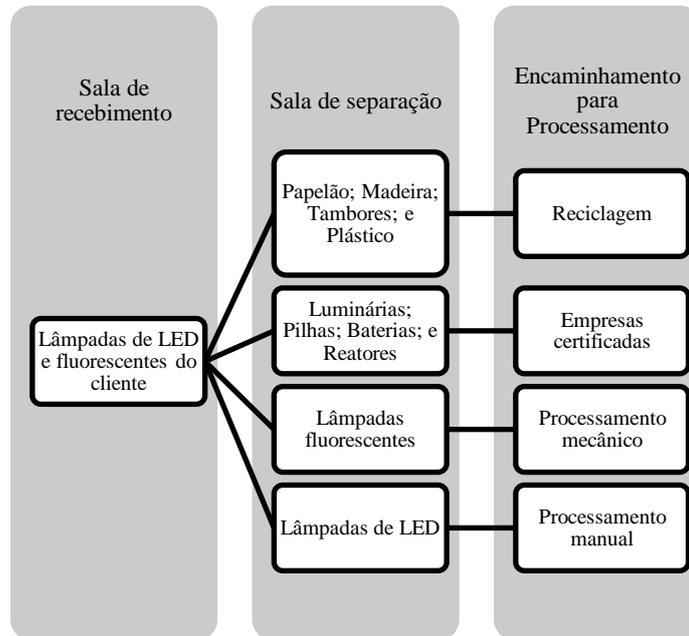


Figura 1: Fluxograma do processo de recebimento.

A partir deste momento, as lâmpadas são colocadas em racks, de acordo com seu tamanho e formato e seguem uma linha de processamento específico. As lâmpadas fluorescentes são encaminhadas a uma sala especial (Figura 2), em que são feitas 40 trocas de ar por hora e antes do ar se dispersar na atmosfera, o fluido gerado internamente passa por um filtro de carvão.



Figura 2: Início do processamento.

A usina de recuperação de mercúrio (Mercury Recovery Technology - MRT) foi importada da Suécia, em 2015 e é o primeiro equipamento desse tipo instalado na América do Sul. Com esse equipamento, são processadas lâmpadas tubulares com tamanhos especiais, lâmpadas compactas e quebradas. O equipamento faz a separação de todos os elementos da lâmpada: vidro, pó fosfórico e ponteiros metálicas e eletrônicas.

Para o tratamento das lâmpadas fluorescentes tubulares de 1,20 m de comprimento, a Tramppo desenvolveu um equipamento específico, que atua de maneira semelhante à MRT, porém apresenta uma capacidade de produção mais elevada. O sistema de filtros local é o que garante a segurança do processo, por isso, sua operação deve ocorrer de forma eficiente. Para garantir a segurança do processo, são realizadas medições periódicas semestrais por empresa terceira, acompanhada pelo órgão ambiental.

O material proveniente da descaracterização de lâmpadas fluorescentes é destinado, de acordo com o direcionamento do órgão ambiental local, a CETESB. O vidro recuperado pelo processo é reinserido na cadeia produtiva, como insumo para indústria cerâmica; o alumínio retorna ao seu ciclo para beneficiamento e transformação em produto de alumínio bruto; e o pó fosfórico contendo mercúrio é inertizado e enviado a aterro. Todos esses processos caracterizando fluxos da economia circular.

Já as lâmpadas de LED são tratadas atualmente de maneira manual, em que têm suas partes desmontadas e seus componentes também reinseridos na cadeia da indústria. A Tramppo envia a parte polimérica para a cadeia de reciclagem do plástico (Figura 3); a placa de circuito impresso para o setor de exportação de peças eletrônicas; e o alumínio segue a mesma jornada quando retirado de lâmpadas fluorescentes.



Figura 3: Plástico retirado das lâmpadas de LED.

A empresa já enxerga um futuro promissor às lâmpadas de LED, como fonte luminosa a substituir as lâmpadas fluorescentes e vem realizando aporte financeiro, para o desenvolvimento de novas tecnologias de segregação mecanizada e recuperação de metais dos diodos, por vias hidrometalúrgicas, corroborando ainda mais nos eixos de economia circular e mineração urbana.

A Tramppo vislumbra muito mais longe, e seus próximos passos estão pautados na recuperação de metais das lâmpadas em fim de vida. Além da produção em escala de um processo mecanizado de segregação dos componentes das lâmpadas de LED, a Tramppo visa desenvolver no Brasil a cadeia de mineração urbana, a qual ainda se apresenta pouco explorada.

A recuperação de metais é um tema extremamente relevante para a empresa, assim como o reaproveitamento da parte polimérica que compõe a carcaça da lâmpada de LED. Esse foco torna-se prioritário, no cenário brasileiro e mundial, pois a tipologia de resíduos tratada pode se tornar uma fonte secundária importante, reduzindo o montante disposto em aterro e fomentando modelos de negócio de impacto.

Apesar de todas as iniciativas que visam ao melhor aproveitamento dos equipamentos de iluminação em geral, a Tramppo enfrenta alguns entraves, como a falta de definição de normas, principalmente relacionadas à periculosidade dos processos de transporte e reciclagem, tanto para lâmpadas fluorescentes como para lâmpadas de LED e a morosidade na elaboração das leis ambientais que acompanhem a evolução tecnológica que conduz o setor de iluminação.

Ainda assim, é visível o esforço da empresa, para se manter no mercado de reciclagem, ultrapassando as barreiras do mercado e investindo em tecnologia e inovação como forma de crescimento e ascensão.

NEXA



A Nexa Resources é uma empresa global do grupo Votorantim, sendo uma das cinco maiores produtoras de zinco do mundo, atuando há mais de 60 anos em mineração e metalurgia, produzindo alumínio, níquel, cobre, chumbo e atuando em diversos segmentos. Possui cinco operações localizadas no Brasil e três no Peru, além de escritórios em Luxemburgo e Estados Unidos. Desde 2017, suas ações são negociadas nas Bolsas de Valores de Nova York e Toronto, sendo seu acionista majoritário a Votorantim S.A. A unidade da Nexa, em Juiz de Fora (MG), possui 499 empregados e 277 parceiros fixos. No Brasil, a Nexa contabiliza 5.349 postos de trabalho.

Em 2020 a empresa processou 79 mil e 204 mil toneladas de zinco metálico nas unidades Juiz de Fora e de Três Marias (MG), respectivamente.

Em 2019, a companhia atingiu uma receita líquida de 2,3 bilhões de dólares, quando foram produzidas 86 mil toneladas de zinco metálico. Em 2020 a receita, apesar da pandemia, alcançou 2 bilhões de dólares, bem como um aumento de 15% para o EBITDA em relação ao ano anterior. Tais resultados foram atingidos, a partir da desvalorização da moeda quanto ao dólar e à redução dos custos de produção e exploração. A Nexa destaca ainda que 97% da energia consumida pela unidade são provenientes de autoprodução, ou seja, produzidas por hidrelétricas próprias.

Figura 1. Áreas de atuação do grupo Votorantim no Brasil



A Nexa é a única empresa de mineração que tem atuado de forma sistemática, na reciclagem de pilhas e baterias no Brasil, em aderência aos requisitos da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305 e Decreto nº 7.404 de 2010). Estima-se que, no Brasil, sejam consumidos 700 milhões de pilhas anualmente e que apenas 5% desse total sejam descartadas de forma ambientalmente

correta. A companhia atua, em conformidade com os ODS 9 e 12, conforme divulgado pelo [relatório anual](#). O reúso de resíduos e coprodutos é uma das políticas de sustentabilidade da empresa.

A Nexa tem promovido ações no sentido da recuperação de resíduos e coprodutos de processos produtivos próprios (Figura 2). Entre as ações empreendidas quanto a promover a economia circular, em seus processos produtivos, estão: a recuperação de sucata, a partir de linha branca e automobilística como insumo produtivo, a reciclagem do aço, reciclagem de latão/bronze, reinserção de pó de aciaria em processos produtivos e o processamento de pilhas e baterias pós-consumo.

Figura 2. Ações para a economia circular no Brasil



Com atuação inovadora e sustentável, a unidade recicladora da companhia mantém uma parceria com a gestora Green Eletron e a empresa GM&CLog, com o propósito de contribuir para a economia circular por meio da logística reversa. Desde 2013, a unidade promove a reciclagem de pilhas comuns, alcalinas, recarregáveis, além de baterias portáteis.

A proposta conta com 31 pontos de coleta de pilha distribuídos pela cidade de Juiz de Fora. Estima-se que, no primeiro trimestre de 2021, foram recicladas mais de 83 toneladas de pilhas, com a recuperação do equivalente a 20% da produção de zinco pela empresa na cidade de Juiz de Fora. Ações sociais também são priorizadas pela empresa. Durante a pandemia, a Nexa alocou 15 milhões de dólares, entre doações e custos operacionais, incluindo cilindros de oxigênio e equipamentos hospitalares, para auxiliar ações de combate à Covid-19, nos municípios e regiões onde atua no Brasil e no Peru.

O processo de processamento das pilhas pós-consumo consiste no descarte por parte dos consumidores nos pontos de coleta, recolhimento e envio para o processamento metalúrgico após a trituração para a remoção das capas das pilhas e baterias. O processamento químico possibilita a recuperação de óxidos metálicos com potencial de reinserção como insumos em cadeias produtivas

na forma de pigmentos e corantes. A partir do processo térmico, é possível a separação e oxidação do zinco a ser recuperado.

Neste caso, a economia circular se justifica pela recuperação de zinco, a partir das pilhas e baterias, bem como pelo reaproveitamento do pó residual de aciaria elétrica.

A geração atual de Pó de Aciaria elétrica (PAE) é de 60% da capacidade instalada. A projeção média de crescimento de 5%, nos próximos 5 anos, alcançará 70% do potencial.

A operação da unidade de reciclagem do pó de aciaria elétrica (PAE) teve início, em 2012, por meio de uma startup com capacidade instalada de 170 kt/ano. Outra iniciativa da empresa é o agregado Waelz, uma nova rota tecnológica que consiste em 30% de escória e 70% de minério. As análises do material evidenciaram boa resistência mecânica e baixa geração de finos, possibilitando a fabricação do ferro gusa.

Figura 3. Processo de reciclagem de zinco



De acordo com dados do relatório anual, a empresa possui compromisso com ações consolidadas, como o Global Compact, as Metas de Desenvolvimento Sustentável da ONU, o Carbon Disclosure Project (CDP), para a gestão de recursos hídricos e, mais recentemente, o projeto Women in Mining que busca expandir e fortalecer a participação de mulheres no setor de mineração.

CIRCULAR BRAIN



A Circular Brain se apresenta como uma CircularTech, ou seja, uma startup de tecnologia que cria soluções digitais, na área de economia circular de eletroeletrônicos, que teve início em dezembro de 2019, com empreendedores com mais de 10 anos de história em empresas do setor.

Pautada no conceito-base da economia circular, que foca na recuperação e rastreabilidade escalável de ativos, a empresa caracteriza-se como uma CircularTech, pois, por ir além da reciclagem, é mais que uma Cleantech. Tem atuação de Fintech, emitindo, certificando e custodiando créditos de logística reversa, lastreados em dados de rastreabilidade, coletados dentro de seu ecossistema digital por um algoritmo exclusivo que controla o ciclo de vida de produtos eletrônicos. Estimula a geração de emprego e renda na base da pirâmide pela adoção da manufatura reversa manual, gerando impacto ambiental, econômico e social positivo.

Percebendo a diversidade e complexidade inerente à gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, a empresa busca minimizar os impactos negativos e otimizar o potencial da gestão de diferentes tomadores de decisão, gerenciamento de materiais perigosos, materiais valiosos e um quadro regulatório complexo e com pouca harmonização. O mapeamento dos canais de informação e processos da cadeia de suprimentos foi a base para a proposição de soluções.

O primeiro produto desenvolvido pela startup é o Ecossistema Digital Think Circular, um Marketplace que, ao permitir a conectividade de diferentes etapas da cadeia de suprimentos na logística reversa, funciona como um hub digital, para a gestão do ciclo de vida de produtos, aderindo ao paradigma do produto como serviço e reciclagem de produtos complexos.

Como aspectos-chave do segmento, a empresa identificou por parte dos clientes a necessidade da redução de custos logísticos, segurança da informação, atendimento aos requisitos regulamentais, assegurar a gestão eficiente e segura dos resíduos, com baixo custo. Foram também identificadas como necessidades dos recicladores a busca por amplo canal de conectividade com os clientes e com diferentes elos da cadeia de suprimentos, potencial de captura de mercado, apoio à decisão quanto ao direcionamento de investimentos e atendimento aos requisitos legais.

Desta forma, apresentando soluções sustentáveis integradas, a Circular Brain configura-se como o primeiro ecossistema digital no mundo para a rastreabilidade e gestão do ciclo de vida de equipamentos eletroeletrônicos, pautado em ferramentas de inteligência artificial, rastreabilidade e gestão em nuvem. A empresa aposta nos segmentos de reúso, recondiçãoamento, remanufatura, reciclagem e mercado de crédito de reciclagem de equipamentos eletroeletrônicos como commodities.

A empresa baseia sua atuação sobre o efeito rede, que consiste na interconectividade e geração de valor entre os agentes da cadeia reversa, em que maior cobertura geográfica de recicladores conectados reduz o custo de operação, para produtores e grandes geradores, em consequência, aumentando as taxas de reciclagem, o que motiva a adesão de novos agentes e maior engajamento de segmentos desse mercado, assim como maior diversidade de produtos e materiais atendidos. A proposta integra ainda sistemas governamentais, como, por exemplo, o sistema de Movimentação e Transporte de Resíduos (MTR) e o Sistema Nacional de Informações sobre Resíduos (SINIR), o que reduz o tempo de gestão da burocracia e o risco de conformidade de toda a cadeia da logística reversa.

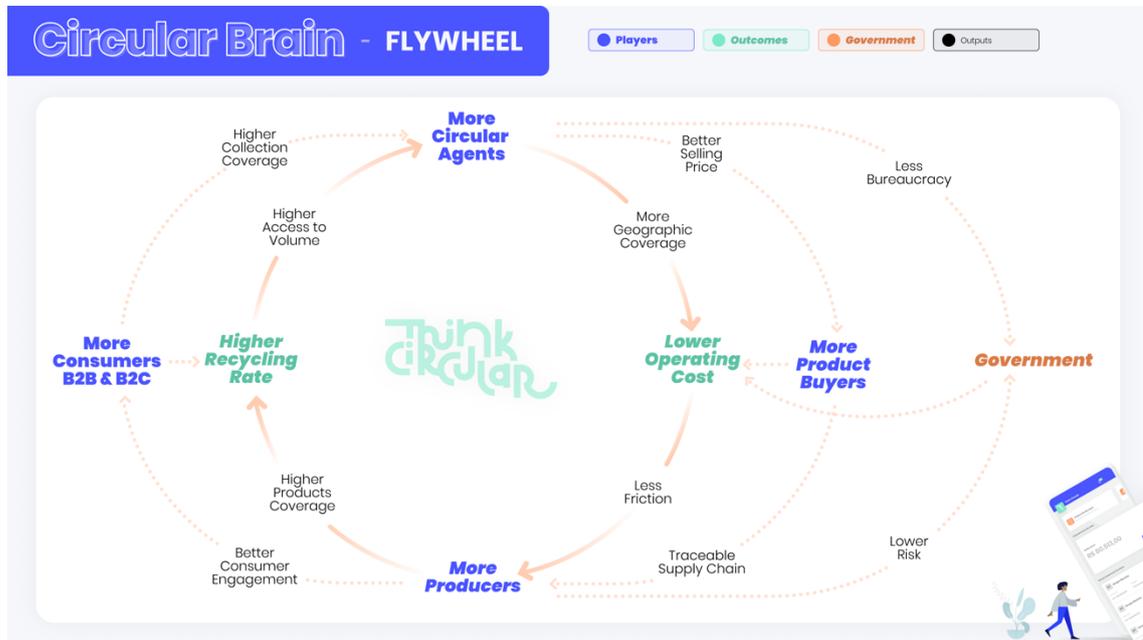


Figura 1. Fluxo dos processos da Circular Brain.

A Circular Brain oferece um software completo de gestão comercial, operacional e ambiental, para agentes de Economia Circular (Recicladores, Recondicionadores e Assistências Técnicas), que os conecta com o complexo do sistema de logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. Amplia, dessa forma, o escopo de atendimento às metas anuais estabelecidas, para a implantação da logística reversa no Brasil, mediante a adesão dos recicladores e permitindo uma atuação integrada como um sistema único. O software foi construído sobre uma plataforma que já atende normas internacionais e nacionais no segmento, como a norma ABNT NBR 16.156:2013, segundo a qual a plataforma é certificada.

A inovação do sistema mostra-se disruptiva, ainda, ao possibilitar a viabilização de créditos de reciclagem tokenizados, que controlam do fluxo de produtos, reuso, até a reinserção de materiais, assim como financia a cadeia. A estrutura de rastreabilidade e o atendimento aos requisitos legais da solução como um todo permitem a comprovação do descarte ambientalmente adequado, criam uma cadeia de suprimentos confiável, em termos de mercado (fair trade) e, conseqüentemente, lastro do sistema de crédito de reciclagem.

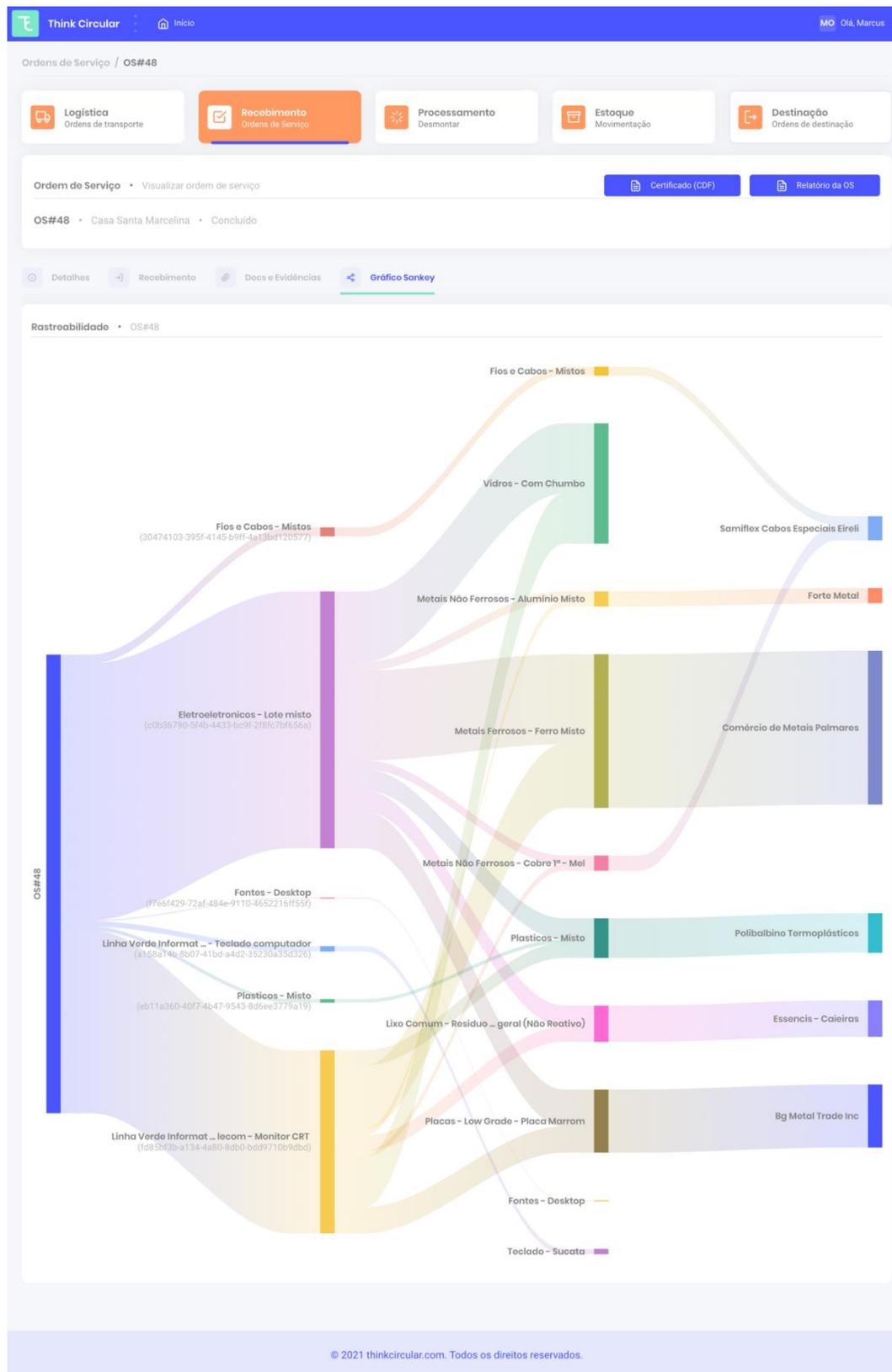


Figura 2. Fluxos gerenciados pela Circular Brain.

Em um próximo estágio, a empresa está estabelecendo parceria com a ABNT, para a comercialização da certificação para recicladores regionais e, assim, expandir a capacidade produtiva nacional em conformidade com os requisitos da norma NBR 16.156. As soluções propostas são aderentes aos sistemas de gestão empresarial, permitindo o fluxo de informações e verificações, integrando sistemas convencionais como CRM, MRP e ERP.

A Circular Brain atualmente possui uma base de recicladores em 12 estados brasileiros e mais de 12.000 pontos de entrega cadastrados. Já levantou mais de 200 recicladores e quase três mil pequenos produtores e importadores com potencial para integrarem o Ecosystema. A empresa possui parceiros e negociações internacionais na Ásia e África. Busca-se ampliar o escopo de atuação para atender ainda a América Latina.

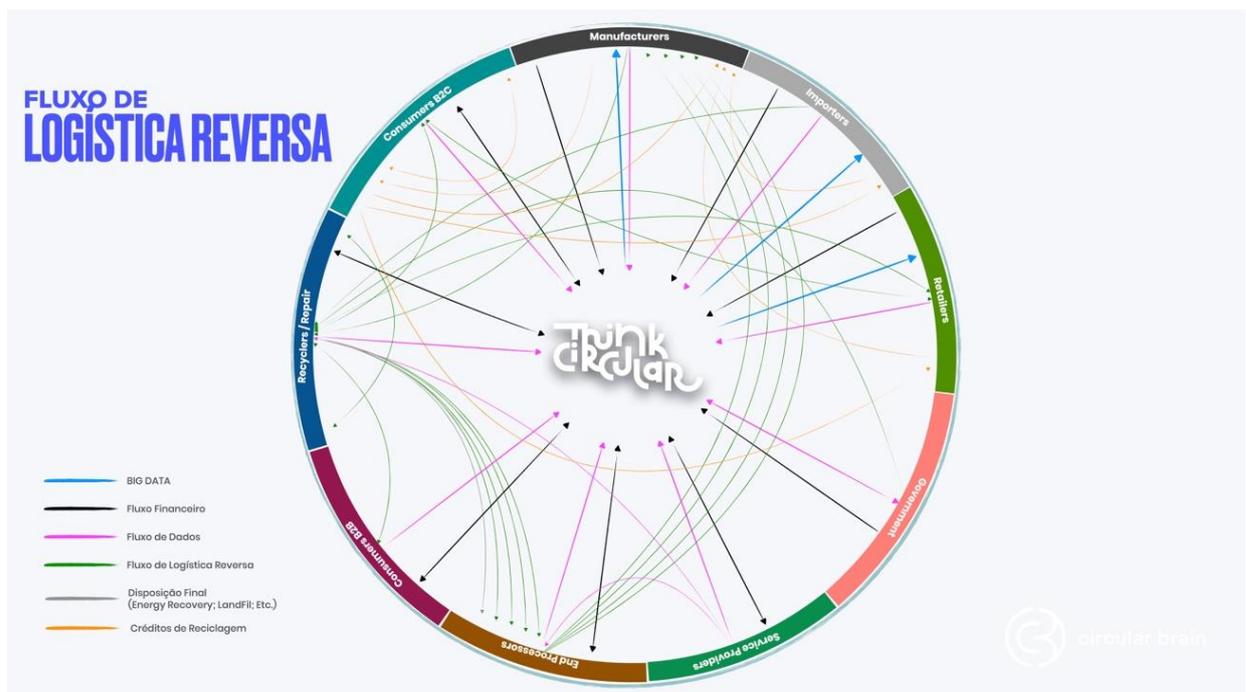


Figura 3. Fluxos de logística reversa da Circular Brain.

O livro *Mineração Urbana - Conceitos e análise do potencial dos resíduos eletroeletrônicos* - aborda, de forma atual e relevante, um dos maiores problemas sanitários brasileiro: a gestão dos resíduos eletrônicos e, em especial, da logística reversa. O tema tem avançado no Brasil, embora enfrente obstáculos como a mudança de comportamento do consumidor e adaptação do parque de reciclagem. De um lado, os produtos eletroeletrônicos podem conter em sua composição substâncias perigosas enquanto que, por outro lado, podem ter alto valor agregado se retornado ao ciclo produtivo, reduzindo a pressão por recursos naturais. O livro discute formas para avançarmos no tema com a rastreabilidade e segurança. Os autores conseguiram transformar o dilema da pandemia em uma oportunidade de melhoria na gestão dos resíduos no Brasil.

Sabrina Andrade

Gerente de Projeto do Departamento de Gestão de Resíduos e Qualidade do Solo
Secretaria de Qualidade Ambiental - Ministério do Meio Ambiente

Este livro traz em linguagem acessível o resultado de mais de dez anos de estudo sobre um tema emergente: a mineração urbana e sua contribuição para uma economia mais circular. Além de uma clara apresentação dos conceitos, as autoras fornecem também uma análise do potencial de sua aplicação em vários exemplos, no caso dos resíduos eletroeletrônicos no Brasil. Assim, sua leitura é estimulante não apenas para os especialistas nesse campo mas para o público interessado em ações concretas para implantar um estilo de desenvolvimento mais sustentável no país.

Emilio Lebre La Rovere

Professor Titular, PPE/COPPE/UFRJ, Coordenador, CentroClima e LIMA/COPPE/UFRJ
Centro de Estudos Integrados sobre Meio Ambiente e Mudanças Climáticas - CentroClima

O mundo deve caminhar mais rápido para uma maior adesão a práticas mais sustentáveis na produção e no consumo. Iniciativas em economia circular e em mineração urbana se multiplicam rapidamente. O aproveitamento dos metais e materiais dos resíduos eletroeletrônicos aumentará sua importância nos próximos anos. A mineração urbana deverá crescer complementando a mineração tradicional de metais. Quem se interessar por este tema encontra neste livro organizado por Lúcia Xavier e Mariana Ottoni um excelente texto para entender os desafios para a implementação dessas boas práticas, especialmente no Brasil.

Fernando Antonio Freitas Lins

Engenheiro Metalúrgico
Mestre e Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais COPPE/UFRJ
Pesquisador Titular e ex-Diretor do CETEM/MCTI