

Economia circular e a redução do impacto ambiental do lixo eletrônico

Luiz Fernando Whitaker Kitajima¹, George Henrique de Moura Cunha²

¹(Professor do Centro Universitário UDF e Faculdade da Confederação de Agricultura e Pecuária do Brasil – CNA. E-mail: luizfwk@gmail.com)

²(Professor do Programa do Mestrado em Administração do Centro Universitário Alves Faria. E-mail: george.cunha@unialfa.com.br)

Abstract:

O lixo eletrônico é uma forma de resíduo sólido constituído de produtos descartados como eletrodomésticos, computadores e periféricos, telefones celulares, etc. O volume produzido deste tipo de resíduo cresce sem parar há décadas, atingindo mais de 53 milhões de toneladas no ano de 2019. O material constituinte deste tipo de resíduo é composto principalmente por metal, vidro e produtos sintéticos, é potencialmente muito poluidor, podendo causar sérios problemas a saúde pública através da contaminação do ar, água e solo em caso de descarte inadequado. Além disso a extração das matérias-primas deste tipo de equipamento é extremamente impactante ao ambiente, especialmente a mineração. A mitigação deste tipo de problema ambiental exige métodos, técnicas e legislação adequadas. No Brasil, por exemplo, existe a Lei da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, a Lei 12.3015/10, que provê uma base legal para a disposição final adequada do lixo eletrônico, e há a Economia Circular, em que um produto apresenta um ciclo de vida composto pela fabricação, uso, descarte e posterior reuso ou reciclagem. Na Economia Circular, o resíduo torna-se matéria-prima para produtos novos, reduzindo assim o volume do material descartado, como também reduz a pressão sobre recursos naturais, ou nos impactos ambientais causados pela extração da matéria-prima. A Logística Reversa é um componente importante dentro da Economia Circular para que ocorra o retorno do material descartado para fabricantes ou empresas de reciclagem. Com o uso destes princípios, pode-se assim reduzir o volume de resíduos, poluição ambiental e consumo de recursos naturais. A aplicação destes procedimentos ainda apresenta problemas e obstáculos, mas seu potencial como meio de mitigação deste tipo de impacto ambiental é grande.

Key Word: Economia circular; meio ambiente; resíduos sólidos.

Date of Submission: 05-01-2023

Date of Acceptance: 19-01-2023

I. Introdução

A demanda por matérias-primas tem crescido de forma constante, acompanhando o crescimento da população mundial (MOTA, 2006). Por exemplo, a atividade de mineração é exercida desde a chamada pré-história, sendo hoje a base econômica de muitas nações, inclusive para o Brasil, e fornecedora de matérias-primas essenciais para os vários ramos das atividades econômicas (BRASIL, 2001). Essas matérias-primas também são essenciais para outras áreas da sociedade, necessárias a garantia do bem-estar e de qualidade de vida adequadas e dignas (SILVEIRA, 2015).

Em novembro de 2022, a população mundial atingiu oficialmente a marca de 8 bilhões de habitantes (UNITED NATIONS, 2022), com cada um destes habitantes necessitando de alimentação e água na qualidade desejável para uma boa saúde, abrigo e trabalho, e além disso, a atividade humana em si gera resíduos no estado líquido, sólido e gasoso. A obtenção destes recursos, sua industrialização, os estilos de vida da sociedade e o lançamento dos resíduos no ambiente promovem mudanças nas características biológicas, físico-químicas e sociais que coletivamente são denominadas de impactos ambientais (MOTA, 2006; SANCHEZ, 2013).

O meio ambiente, como um meio dinâmico que através de fenômenos biológicos, físicos, químicos, ecológicos, etc., está constantemente reciclando as substâncias e compostos presentes no meio, graças ao uso da energia do sol ou da energia do calor interno da Terra. Através destes ciclos biogeoquímicos o ambiente natural atinge um equilíbrio na oferta e consumo de matérias-primas e mantendo a qualidade ambiental (CAPAZ E NOGUEIRA, 2014). Porém, os impactos ambientais originados das atividades humanas interferem nesses ciclos, comprometendo a qualidade de vida dos seres humanos e a sobrevivência dos ecossistemas (STEIN, 2017, 2018).

A natureza tem, portanto, uma capacidade limitada de garantir o sustento de um indivíduo em suas diversas necessidades, ou de uma família, comunidade, cidade ou país, através de seus processos naturais. Essa

capacidade de sustento pode ser associada a uma determinada área natural em termos de tamanho da área, e esse conceito é denominado de Pegada Ecológica (REES, 1996). A demanda dos recursos naturais somados com os impactos ambientais de caráter negativo causados pela ação humana pode levar a uma Pegada Ecológica que ultrapassa os limites naturais do planeta, com consequências negativas de grande alcance (REES, 1996).

Os modelos de desenvolvimento por ora usados na sociedade atual têm sido reconhecidamente considerados como inadequados ante o consumo de matérias-primas e geração de resíduos. Modelos que possam usar de maneira mais adequada os recursos naturais e reduzir as emissões de resíduos são considerados mais desejáveis, pois também irão reduzir a Pegada Ecológica (REES, 1996; MOTA, 2006; COSTA, 2011). O desenvolvimento que garante a manutenção dos recursos naturais (e a respectiva qualidade ambiental e social), tanto para o presente como para o futuro, equalizando os ciclos e processos naturais com a economia é o chamado desenvolvimento sustentável, formalmente formulado em 1987 nas Nações Unidas no Relatório Brundtland (NASCIMENTO, 2016).

Porém, não basta ter um modelo burocratizado e teórico, mesmo que possa ser aplicado em sua plenitude na realidade, ela irá exigir também uma mudança de comportamento na sociedade. Em especial, aspectos como redução das desigualdades sociais, acesso mais equitativo a educação e saúde, condições dignas de moradia e trabalho, etc., fazem parte desta realidade, mas também a mudança nas atitudes (COSTA, 2011; NASCIMENTO, 2016). Por mudança nas atitudes inclui redução nos níveis de consumo, especialmente consumo inútil e acima das necessidades, procura por produtos que tenham características que sejam mais adequadas a sustentabilidade, disposição correta dos resíduos domiciliares, procura de serviços que possam auxiliar na redução de impactos ambientais (como reciclagem), entre outros (COSTA, 2011; NASCIMENTO, 2016).

A sustentabilidade não se limita à tecnologia mais limpa e que use menos recursos, mas se estende a comportamentos e processos gerenciais e administrativos da sociedade. Isso cria um conjunto de iniciativas e conceitos que atuam com o objetivo comum da sustentabilidade para um produto ou um processo (COSTA, 2011; NASCIMENTO, 2016).

Equipamentos eletroeletrônicos, especialmente computadores e de telefonia celular, são exemplos típicos de produtos cujo consumo cresce constantemente, em especial se considerar que são ferramentas essenciais de trabalho em praticamente todas as áreas da atividade humana, como educação, engenharia, segurança, medicina e economia/finanças, além de serem usados para comunicação. São produtos que demandam muitas matérias primas como produtos sintéticos (plásticos) e metais, e sua produção demanda muita energia (XAVIER E CARVALHO, 2014).

A extração das matérias primas destes equipamentos por sua vez é muito impactante, especialmente a mineração e o beneficiamento dos recursos minerais (BOMFIM, 2017), e tais equipamentos podem ter ciclos de vida relativamente curtos, em um processo de obsolescência planejada, forçando seu descarte e gerando um resíduo sólido denominado de lixo eletrônico, e-lixo, lixo tecnológico ou Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) (XAVIER E CARVALHO, 2014).

Por lei, no Brasil a atividade de mineração é uma atividade que deve ser licenciada ambientalmente devido a seu impacto ambiental (Artigo 2º da Resolução 1/86 do CONAMA), enquanto o REEE é um tipo de resíduo cujo manuseio e descarte final está normatizado pela lei 12.305, a Lei da Política Nacional dos Resíduos Sólidos de 2010 (BRASIL, 2001, 2017). Como o equipamento eletroeletrônico é ambientalmente impactante na obtenção de sua matéria prima como também no seu descarte, uma ação integrada e holística na gestão ambiental deste produto pode ser uma opção para promover e aplicar a sustentabilidade para este produto. Um destes procedimentos é a chamada economia circular, que é um princípio econômico em que o ciclo de um produto forma um ciclo fechado, em que seus componentes podem ser reutilizados e/ou reciclados para fabricação do mesmo produto, retendo assim o seu valor e minimizando a entrada de matéria e energia para o mesmo produto (EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY, 2016).

O presente trabalho tem, portanto, como tema principal os problemas ambientais associados aos produtos eletroeletrônicos, com a hipótese de que a aplicação dos princípios e métodos da economia circular pode minimizar ou controlar estes impactos ambientais de caráter negativo tanto no começo do processo (mineração) como no fim (descarte).

II. Metodologia

Neste artigo baseou-se no levantamento bibliográfico e textos sobre: economia circular, mineração, lixo eletrônico (ou REEE). Também se utilizou de trabalhos de graduação sobre lixo eletrônico em que trabalhos de laboratório e entrevistas foram usados para entender a realidade do mercado de lixo eletrônico e de processos de reciclagem que procuram reutilizar suas matérias-primas.

III. Resultados e discussão

3.1 Lixo eletrônico e seus impactos ambientais

O lixo eletrônico é um resíduo sólido definido por Baldé et al. (2017), Forti et. al. (2020) e Wagner et al. (2022) como sendo equipamentos elétricos/eletrônicos, em sua totalidade ou suas partes, que são descartados sem a intenção de posterior reuso. Estes equipamentos são agrupados em: equipamentos de refrigeração/aquecimento. Exemplo: geladeiras, freezers; monitores e telas de televisão; lâmpadas, especialmente fluorescentes e LED; equipamentos de grande porte. Exemplos: copiadoras, fogão elétrico, painéis fotovoltaicos; equipamentos de pequeno porte. Exemplos: fornos de micro-ondas, secadoras de cabelo, rádios; equipamentos de TI (Tecnologia da Informação) como telefones celulares.

A produção global deste resíduo vem crescendo constantemente, sendo que no ano de 2019 foram produzidos cerca de 53,6 milhões de toneladas métricas de lixo eletrônico em todo o mundo, um crescimento de 21% em relação a 2014 (FORTI, et al., 2020; WAGNER, et al. 2022). O Brasil produziu nesse ano o total de 2,143 milhões de toneladas de lixo eletrônico, perfazendo uma produção entre 10 e 15 kg de lixo eletrônico por pessoa (FORTI, et al., 2020; WAGNER, et al. 2022).

Impactos ambientais são, como foi citado no início deste trabalho, mudanças causadas no ambiente natural (biológico ou físico) e social em decorrência de uma determinada ação. A natureza do impacto é diversa, sendo positiva ou negativa, temporalmente curta ou longa, afetando uma área pequena ou grande, e assim por diante (MOTA, 2006; SANCHEZ, 2013).

Dentro do contexto do presente trabalho, procura-se estudar os impactos ambientais decorrentes de ação antrópica e de caráter negativo, ou seja, que afetam negativamente as características do meio natural ou antrópico e interferem de forma igualmente negativa nos processos dinâmicos naturais, tendo consequências negativas como doenças, redução da biodiversidade, perda de produtividade do solo etc. (MOTA, 2006; SANCHEZ, 2013).

Para o presente trabalho, deu-se ênfase nos impactos ambientais causados por:descarte inadequado do lixo eletrônico no ambiente;extração das matérias-primas (no caso específico, os metais) necessárias para a fabricação dos constituintes do lixo eletrônico.

Pela sua natureza, o lixo eletrônico é constituído de materiais sintéticos, ou plásticos, e de metais. Os principais componentes metálicos são o ferro, alumínio e o cobre, sendo que quantidades menores de outros metais, seja em sua forma pura ou na forma de compostos, incluem o zinco, chumbo, mercúrio, cádmio e ouro (FERREIRA E FERREIRA, 2008; ZHANG E KRUMDICK, 2011). Quanto aos plásticos, o principal deles é o PVC, ou polivinilo cloreto, usado nas carcaças e revestimento de cabos, e retardantes de fogo a base de compostos de bromo, ou BRT (FERREIRA E FERREIRA, 2008). A Tabela 1 a seguir mostra a composição média do lixo eletrônico.

Tabela 1 - composição do lixo eletrônico.

Material	Quantidade (%)
Plásticos	20,6
Ferro/Aço	47,9
Metais não ferrosos	12,7
Vidro	5,4
Placas de circuito impresso	3,1
Madeira	2,6
Outros	7,7

Fonte: Ferreira e Ferreira, 2008; Reis, 2010; Gerbase e Oliveira, 2012.

As placas de circuito impresso são componentes que são encontrados em 90% dos equipamentos eletrônicos, sendo essenciais ao seu funcionamento, e sua composição está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - composição da placa de circuito impresso

Material	Quantidade
Metais	26% - cobre, ferro, zinco e estanho. 2% - demais metais, incluindo ouro, prata e paládio.
Plásticos (principalmente PVC)	19%
Bromo (retardante de fogo)	4%
Materiais Cerâmicos, Vidros e Óxidos	49%

Fonte: Ferreira e Ferreira (2008) Reis (2010); Gerbase e Oliveira (2012).

Dos metais que compõem uma placa de circuito impresso, são encontrados (em média) 14% de cobre, 6% de ferro, 2% de níquel, 2% de zinco, 2% de estanho, 0,3% de prata, 0,04% de ouro e 0,02% de paládio (OLIVEIRA, 2010).

Estas substâncias, expostas na natureza após disposição final feita de forma inadequada, podem ser lixiviadas pelas chuvas ou queimadas, e com isso promover a contaminação do solo, ar e águas superficiais e/ou subterrâneas. A exposição do lixo eletrônico ao ar livre pode levar a corrosão e lixiviação de seus componentes tóxicos pelas águas de chuva, rompimento de tubos de raios catódicos (CRT) de monitores e equipamentos de televisão, mistura de plásticos e óleos, entre outros efeitos causados pelo descarte inadequado (FERREIRA, FERREIRA, 2008; OLIVEIRA, 2010).

Dentre os problemas de saúde na população causados por exposição aos mesmos incluem problemas neurológicos, respiratórios, imunológicos, teratogênicos e o câncer, sendo alguns exemplos citados Quadro 1 a seguir (REIS, 2010; GERBASE E OLIVEIRA, 2012; FORTI et al., 2020).

Quadro 1 - exemplos de substâncias presentes no lixo eletrônico e seus efeitos adversos a saúde humana

Substância	Efeito
Cobre	Problemas gastrointestinais (dores, vômitos, etc.), danos ao fígado quanto a ingestão excessiva de sais de cobre.
Chumbo	Danos no sistema nervoso especialmente em crianças, ao sistema circulatório, com impactos nos rins e na reprodução.
Mercúrio	Danos no cérebro e fígado; afeta fetos em formação.
Cádmio	Problemas nos ossos, rins, próstata e pulmões
Arsênio	Danos na pele e no pulmão; agente cancerígeno (exemplo: câncer linfático).
PVC (Polivinilcloro) - plástico	Ao ser queimado, gera substâncias tóxicas.
Retardantes de chama à base de bromo (BRT)	Problemas hormonais, no sistema nervoso e reprodutivo.

Fonte: Ferreira e Ferreira (2008); Reis (2010); Gerbase e Oliveira (2012); Ufelle e Barchowsky (2019); Forti et al. (2020).

3.2 Mineração e metais

Como pode ser visto nas Tabelas 1 e 2, metais são um componente importante da composição do lixo eletrônico. A principal fonte destes metais, fora a reciclagem, são os minerais minérios.

O planeta Terra apresenta concentrações variáveis de numerosos elementos químicos, mas o que pode ser extraído se encontra na camada mais superficial do planeta, a crosta. Esses elementos existem em um valor (ou teor) médio na crosta. Se ocorrem áreas ou volumes onde certos elementos estão acima do valor médio, são chamados de recursos minerais. Se esses recursos são delimitados e caracterizados qualitativamente e quantitativamente, são denominados reservas minerais (com respectivo depósito mineral associado). Se tais reservas podem ser aproveitados de forma econômica, considerando-se a tecnologia existente, preço do produto, legislação, etc., é denominado de jazida mineral (NETO, 2003; DAMASCENO, 2017).

O minério é o nome dado ao corpo rochoso que contém os materiais de valor econômico, sendo geralmente constituído de minerais diferentes, sendo os minerais que não tem utilização denominados de ganga, e os minerais que são de valor econômico são os minerais minérios propriamente ditos. Assim, os diversos tipos de operação de retirada do minério em uma jazida mineral são coletivamente denominados de lavra, e a jazida onde ocorre as operações de lavra é denominado de mina. Como o minério possui minerais que são de interesse econômico (mineral minério) com outros minerais e matérias que não são úteis e que são descartados (ganga), são necessárias operações para separar o mineral minério da ganga, e estes processos (de natureza física e/ou química) são chamados coletivamente de beneficiamento (NETO, 2003; BOMFIM, 2017; DAMASCENO, 2017).

As operações de lavra propriamente ditos, sejam subterrâneos ou superficiais, irão demandar mudanças de grande porte no meio físico e biológico, exigindo áreas para as edificações, estradas e vias de acesso, depósitos de minério retirado, etc. As atividades de beneficiamento demandam equipamentos para tratamento do minério, separação do mineral minério e ganga, depósito do material beneficiado e descartado, produtos químicos para o beneficiamento, etc. Além disso, tanto a lavra quanto beneficiamento exigem grandes quantidades de água e energia elétrica (FARIAS, 2002; BOMFIM, 2017; DAMASCENO, 2017). Por consequência, tanto a atividade de lavra quanto a de beneficiamento são reconhecidamente impactantes e geradoras de grande quantidade de resíduos sólidos, líquidos e gasosos, inclusive demandando licenciamento

ambiental para sua operação (BRASIL, 2001), sendo seus impactos principais (FARIAS, 2002; NETO, 2013; BOMFIM, 2017; DAMASCENO, 2017):

- Retirada da cobertura vegetal (especialmente de mineração a céu aberto);
- Poluição dos recursos hídricos;
- Contaminação do solo por elementos tóxicos, especialmente metais pesados (chumbo, zinco, cádmio, mercúrio, etc.);
- Processos erosivos;
- Assoreamento dos corpos de água devido a erosão ou ao descarte de material sólido particulado nas águas;
- Poluição do ar por produtos derivados dos processos de lavra ou beneficiamento, além da queima de combustíveis usados para estes processos;
- Poluição sonora;
- Mortandade de peixes, fuga de animais ou perda do habitat com redução da biodiversidade.

Um exemplo que demonstra os vários impactos ambientais da mineração é com o metal cobre. Como visto na Tabela 2, o cobre representa um constituinte essencial das placas de circuito impresso, além de também ser o constituinte principal de componentes como cabos elétricos e antenas (OLIVEIRA, 2010; SILVA ET AL., 2019).

O cobre é extraído de minerais como a calcopirita (CuFeS_2), cuprita (Cu_2O) e malaquita ($\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$), geralmente em grandes minas a céu aberto, e o beneficiamento é realizado através da britagem e moagem do minério, que transformado em pó é colocado em grandes tanques contendo soluções químicas que através de um processo chamado de flotação separa as partículas do mineral minério da ganga. O concentrado é depois levado para a separação do cobre metálico, que envolve a fundição do mesmo em altas temperaturas e seu refino e purificação com uso de eletrólise (DAMASCENO, 2017; SILVA ET AL., 2019).

Nestes processos, a ganga descartada durante o processo de beneficiamento pode chegar a 99% do material extraído na mina, sendo aproveitado apenas 1% como mineral minério (BOMFIM, 2017; DAMASCENO, 2017). Esse material descartado, além de conter resíduos de cobre, pode conter enxofre e metais pesados como o arsênio, cádmio, chumbo e zinco, que são comuns nos minerais de cobre (DEER, HOWE, ZUSSMAN, 2013), e dos quais no Quadro 1 são apresentados os efeitos deletérios à saúde humana de alguns destes elementos.

O resíduo é frequentemente acumulado em represas ou barragens de rejeitos que podem levar a contaminação do subsolo e das águas subterrâneas, e o rompimento das represas pode, além do efeito de inundação do material, pode ampliar ainda mais a área contaminada por tais elementos ou seus compostos (FARIAS, 2002; NETO, 2013; BOMFIM, 2017; DAMASCENO, 2017). O enxofre, por sua vez, pode promover a acidificação das águas superficiais e do solo, bem como formar vapores ácidos e chuvas ácidas (NETO, 2003; BOMFIM, 2017).

3.3 Economia Circular e Logística Reversa

Diante desta realidade, é evidente que mecanismos para a redução destes impactos de caráter negativo ao ambiente natural e à saúde pública são necessários. Tais mecanismos podem ser de natureza puramente técnica / tecnológica, como equipamentos que utilizem materiais menos tóxicos, utilizem menos energia ou matérias-primas, que se desgastem menos, mas que também incluam ações de natureza gerencial, legal ou política (COSTA, 2011; NASCIMENTO, 2016). Para esse último caso pode-se ressaltar a chamada economia circular.

O conceito de economia circular é de que produtos e seus serviços associados formam um sistema industrial regenerativo, um ciclo fechado, em que o produto descartado voltará a ser aproveitado para a fabricação do mesmo tipo de produto, enfatizando também o uso de energias mais limpas, matérias-primas cuja obtenção seja a menos impactante possível e que tenham *designs* que incrementem a sua sustentabilidade (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; SANTOS, SHIBAO, SILVA, 2019).

Enquanto, a economia linear envolve a extração da matéria-prima, fabricação do produto, consumo do produto e seu descarte definitivo, a economia circular envolve o princípio da termodinâmica que matéria e energia não podem ser criados do nada ou destruídos para o nada, apenas transformados. Neste caso, em uma economia circular há alguns princípios básicos (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013):

- retirada do desperdício ou descarte (*waste*), através do correto desenho dos componentes do produto para terem um ciclo de desmonte, reciclagem e/ou reuso, ao invés de receberem disposição final e definitiva em lixões ou aterros sanitários;

- o material consumível deve representar material biológico que pode ser naturalmente reaproveitado com consequências benéficas para os ecossistemas, enquanto o material durável, que não é processado por meios biológicos, como plásticos e metais, são desenhados desde o começo para o reuso ou reciclagem;

- -a energia necessária para acionar este ciclo deve vir de fontes renováveis;

- -o consumidor passa a ser mais usuário do que consumidor. Deve-se valorizar o empréstimo, aluguel ou arrendamento do produto, ou em caso de compra definitiva, que exista mecanismos entre os fabricantes e vendedores para o retorno do produto aos mesmos caso o comprador decida descartar o produto usado.

O resultado é que o produto, que no caso em estudo no presente trabalho são os equipamentos eletroeletrônicos, quando deixam de ser usados pelos seus compradores, são devolvidos aos vendedores e fabricantes, ao invés de direcionados para descarte final. Logo, existe a necessidade de se criar meios para que o consumidor seja devidamente informado sobre o retorno do produto, as linhas de logística para a recepção e retorno dos materiais aos fabricantes e dos processos de reciclagem e reuso (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; SANTOS, SHIBAO, SILVA, 2019).

Estes processos devem também vir acompanhados de arcabouços legais e incentivos para que tanto o usuário/consumidor faça a devolução, como as indústrias adotem esse conceito, além da devida formação dos recursos humanos para o gerenciamento e operacionalização da economia circular. Estes aspectos podem, ainda, representar entraves a aplicação da economia circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; SANTOS, SHIBAO, SILVA, 2019).

No Brasil, há a Lei 6938/81, de 1981 (Lei da Política Nacional do Meio Ambiente, ou PNMA) e a Resolução CONAMA 1 de 1986 (BRASIL, 2008) e o Artigo 225 da Constituição Federal (SILVA, 2013), que dispõem da necessidade de redução dos impactos ambientais de atividades poluidoras e sua adequada regulação, e a 12.305/10 (Lei da Política Nacional dos Resíduos Sólidos, ou PNRS) de 2010 que trata da classificação e disposição correta dos resíduos sólidos ou de seu reuso e reciclagem (BRASIL, 2010). O lixo eletrônico, devido a sua capacidade de poluir o meio ambiente, pode mesmo ser classificado como resíduo perigoso de acordo com o Artigo 13. O mesmo pode ser dito dos resíduos das atividades de mineração das diversas matérias-primas usadas na fabricação dos componentes do lixo eletrônico (BRASIL, 2010).

Dentro do contexto específico da PNRS, há o Artigo 30 que propõe a chamada “responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos”. Esse artigo é particularmente relevante ao contexto do presente trabalho pois ela dispõe que a responsabilidade pelo produto e seu ciclo completo, da fabricação ao descarte, está distribuído entre os diversos atores e de forma encadeada, e que tem como objetivos, dispostos no parágrafo único do supracitado artigo (BRASIL, 2010):

- I – compatibilizar interesses entre os agentes econômicos e sociais e os processos de gestão empresarial e mercadológica com os de gestão ambiental, desenvolvendo estratégias sustentáveis;
- II – promover o aproveitamento de resíduos sólidos, direcionando-os para a sua cadeia produtiva ou para outras cadeias produtivas;
- III – reduzir a geração de resíduos sólidos, o desperdício de materiais, a poluição e os danos ambientais;
- IV – incentivar a utilização de insumos de menor agressividade ao meio ambiente e de maior sustentabilidade;
- V – estimular o desenvolvimento de mercado, a produção e o consumo de produtos derivados de materiais reciclados e recicláveis;
- VI – propiciar que as atividades produtivas alcancem eficiência e sustentabilidade;
- VII – incentivar as boas práticas de responsabilidade socioambiental

Deve-se observar que o parágrafo elenca objetivos que são compatíveis e orientados de acordo com as ideias e princípios da economia circular, no tocante a reciclagem e reuso, redução da geração dos resíduos e do consumo de matérias-primas e do desenvolvimento de práticas que estimulem iniciativas que permitam concretizar tais princípios, além de que definem que os atores envolvidos nestes processos têm diversas responsabilidades, resumidos por Moi et al. (2012) e com adição dos presentes autores, de acordo com o Quadro 2 a seguir.

Quadro 2 – Resumo das responsabilidades dos atores envolvidos no ciclo dos equipamentos eletrônicos.

Atores	Responsabilidades
Produtores/fabricantes / responsáveis pelo transporte e reciclagem do material descartado	-Responsabilidade pelo produto mesmo após a sua vida útil, promovendo a Logística Reversa; -Rotulagem adequada para promoção da Logística Reversa; -Ecoconcepção do produto, visando reduzir os riscos do produto quando este for resíduos; -Obrigações financeiras para com entidades gestoras do resíduo, especialmente se contratadas pelos produtores; -Realizar o desmonte e reciclagem em condições seguras e ambientalmente adequadas, e em consonância com a dignidade e segurança dos trabalhadores envolvidos.

Comerciantes / Distribuidores	-Informar clientes e consumidores quanto a logística reversa; -indicar locais de descarte e recebimento do material descartado; -Informar quanto a forma de valorização do resíduo;
Consumidores / Usuários finais	-Promover a correta disposição do lixo eletrônico, promovendo a separação e seleção, assim como entrega dos produtos descartados nos locais adequados.

Fonte: modificado de Moi et al. (2012)

Dentre as ações e iniciativas visando a operacionalização da PNRS, e por extensão o conceito de Economia Circular aplicada aos lixo eletrônico, está a chamada Logística Reversa, citado no Quadro 2. Na PNRS a Logística Reversa está conceituada no Artigo 8 como sendo o conjunto de ações, meios e procedimentos para que os resíduos sólidos (no caso em estudo, o lixo eletrônico) seja coletado e restituído ao setor empresarial, para reaproveitamento dos mesmos no ciclo do produto descartado, em outros ciclos produtivos ou para disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010; STOHRER, PIENIZ, 2015).

Em outras palavras, implica em que uma vez utilizado, o produto a ser descartado deve ser retornado aos seus produtores, e esse retorno é um dos elementos que completa o ciclo fechado (ou ao menos um dos diversos ciclos) da Economia Circular, em que se tem a convergência do disposto na PNRS (BRASIL, 2010; MOI ET AL., 2010; STOHRER, PIENIZ, 2015) e os princípios básicos da Economia Circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; SANTOS, SHIBAO, SILVA, 2019).

Stohrer e Pieniz (2015) indicam que o processo de Logística Reversa ainda tem diversos desafios e dificuldades a serem vencidos, como as dimensões do Brasil e sua grande população, alegações de custos extras por parte de empresas e a necessidade de maior iniciativa por parte do Poder Público para implementar o cumprimento às normas da PNRS.

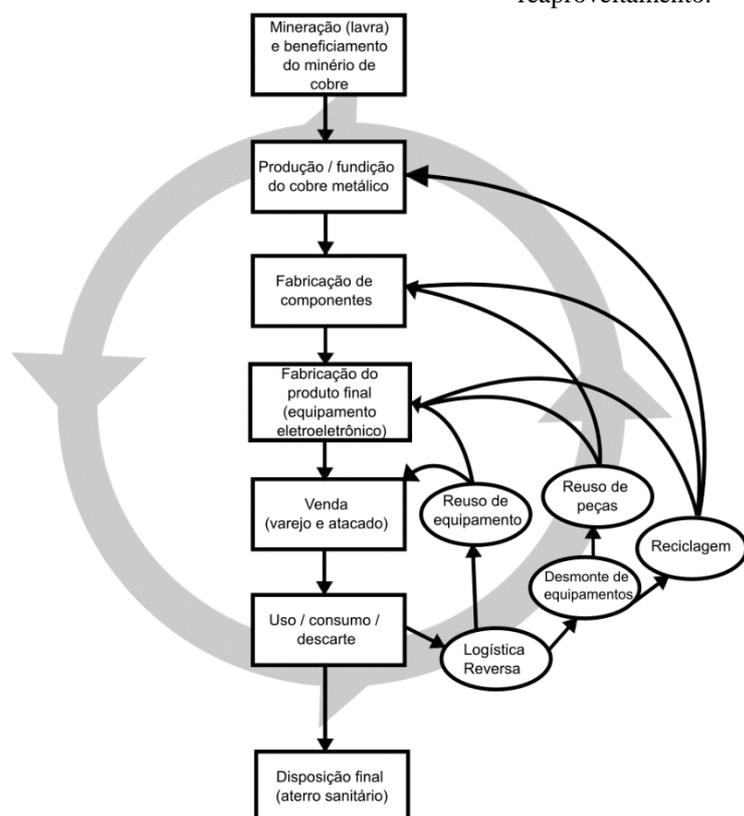
Como foi visto nos parágrafos anteriores, o lixo eletrônico ou REEE representa um tipo de resíduo sólido cujo volume cresce continuamente; esse tipo de resíduo tem alto potencial de impactos ambientais de caráter negativo no meio ambiente; a fabricação deste tipo de produto demanda matérias-primas cuja extração e processamento são igualmente impactantes; que existem normas legais visando o regulamento e disciplinamento do descarte de resíduos; que existem propostas que procuram minimizar esses impactos e promover a sustentabilidade dos produtos envolvidos, que é a Economia Circular, e a Logística reversa é um dos meios de operacionalizar a Economia Circular.

3.4 Exemplo prático: cobre e economia circular

Um exemplo da aplicação dos princípios da Economia Circular e da Logística Reversa, com a finalidade de se atingir a conformidade legal e a sustentabilidade, para produtos eletroeletrônicos e seus resíduos, está no ciclo do metal cobre. Como visto anteriormente, o cobre é uma matéria-prima essencial, sua extração e beneficiamento são ambientalmente impactantes, e seu descarte no meio pode causar problemas à saúde pública e a qualidade ambiental (FERREIRA E FERREIRA, 2008; BOMFIM, 2017; UFELLE E BARCHOWSKY, 2019).

A Figura 1 mostra esquematicamente um procedimento de economia circular aplicado ao cobre em equipamentos eletroeletrônicos.

Figura 1 – Ciclo do cobre em equipamentos eletroeletrônicos, desde sua retirada do minério ao seu reaproveitamento.



Fonte: Ellen Macarthur Foundation, 2013; Forti et al., 2010.

O início do ciclo é representado pela mineração, beneficiamento e produção de cobre metálico a partir do minério, ou então a fundição e refino de cobre a partir do cobre recuperado/reciclado de lixo eletrônico. Com o reaproveitamento/reciclagem do cobre há menor pressão sobre os recursos naturais, haja visto que significa menor demanda pela extração do minério, reduzindo os riscos de retirada da cobertura vegetal, produção de resíduos tóxicos e poluição das águas, solo e ar por elementos como cádmio, arsênio, chumbo e zinco, e da emissão de enxofre para a atmosfera ou para as águas, reduzindo os problemas de chuvas ácidas ou acidificação dos rios e lagos (DAMASCENO, 2017; BOMFIM, 2017; SILVA ET AL., 2019). Esta iniciativa também mitiga a demanda de água, energia elétrica e produtos químicos usados no beneficiamento do minério, na extração e refino do cobre metálico (DAMASCENO, 2017; BOMFIM, 2017; SILVA ET AL., 2019).

Segue-se, de cima para baixo no diagrama da Figura 1, a produção de componentes e do produto final, seguindo-se sua entrega para venda ao consumidor final. Após o uso, ou consumo, ocorre o descarte do produto.

Após a decisão de descarte do equipamento, o mesmo deve ser entregue a empresas que realizem a logística reversa, seja entregando diretamente para os vendedores, fabricantes ou para empresas especializadas nos processos de reciclagem do lixo eletrônico. Pontos de coleta podem ser instalados nas lojas ou pontos de venda, nas fabricas (se possível) ou em outros locais (áreas de intenso movimento, etc.) para recebimento e encaminhamento do lixo eletrônico (OLIVEIRA, 2010; CONDE, XAVIER, FRADE, 2014).

O equipamento pode ser submetido a manutenção e revendido pelos comerciantes ou pelos fabricantes, podendo ser descaracterizado (certas características físicas e conteúdo de informações apagados) e parcialmente remontado com peças novas, se necessário, e o equipamento assim montado é revendido. Outro caminho é o total desmonte e separação, seguida de triagem, das partes desmontadas, onde estes componentes podem ser reutilizados em equipamentos novos, seguidos ou não de algum tipo de manutenção (OLIVEIRA, 2010; CONDE, XAVIER, FRADE, 2014).

No caso de não ocorrer o reaproveitamento do produto ou componente, segue-se que o respectivo conteúdo de cobre pode ser separado manualmente no desmonte (fios e cabos, por exemplo), enquanto outras partes podem ser separadas através da cominuição, que é o processo de fragmentar mecanicamente os equipamentos e usar métodos como magnetos e ímãs para separar materiais ferrosos. Outras partes, como as integrantes de placas, podem ser separado quimicamente por meio de banhos ácidos, em um processo chamado de hidrometalurgia, onde o ácido dissolve certos metais, como o cobre, e o cobre é posteriormente separado por precipitação química ao formar sal com adição de uma base (OLIVEIRA, 2010; CIMINELLI, 2007).

Nesta fase do processo de economia circular, temos a recuperação do cobre seja pela reutilização da peça contendo o metal, com ou sem algum tipo de reparo, ou a reciclagem do metal, com a extração do cobre metálico que será então utilizado na fabricação de peças e componentes novos nas fábricas.

Dentro desta fase do processo de reutilização ou reciclagem do cobre é importante ressaltar a necessidade de uma devida estrutura para o recebimento do material descartado, sua separação, desmonte, remanufatura e triagem, bem como o controle da emissão de resíduos e da segurança dos processos, pois eles podem, como citado anteriormente, usar produtos químicos como ácidos ou bases fortes, maquinário e eletricidade. Deve-se notar ainda que existem países no mundo onde a reciclagem de lixo eletrônico é realizada de forma inadequada, causando mais impactos ambientais do que resolvendo-os, e usando mão de obra sem treino, proteção, apoio legal entre outras mazelas (FERREIRA E FERREIRA, 2008; FORTI ET AL, 2010; MOI ET AL., 2012).

Em um ciclo linear, aberto, ocorre a extração do minério, beneficiamento, extração do metal, manufatura do produto, uso e descarte, que é lançado em aterros ou outro tipo de disposição final, muitas vezes sem as devidas providências para proteção do ambiente. Já no ciclo fechado ou circular, o cobre retorna na forma do componente (reuso) ou reciclado, e ao mesmo tempo promove a mitigação ou diminuição do impacto na origem, ou seja, mineração, o que está de acordo com as bases da Economia Circular (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013; SANTOS, SHIBAO, SILVA, 2019).

Junto com o ganho ambiental deste ciclo fechado, deve-se notar que há o fato de que o cobre, assim como outros metais, é bem de valor econômico. Segundo Forti et al. (2020), os seguintes elementos químicos metálicos presentes no lixo eletrônico (cobre, ferro, cobalto, alumínio, germânio, índio, antimônio, bismuto, rutênio, ródio, paládio, irídio, ósmio, platina, ouro e prata) somaram 25 milhões de toneladas, totalizando um valor de 57 bilhões de dólares americanos somente no ano de 2019. Desse montante, o cobre somou 1,8 milhão de toneladas, com um valor de 10,96 bilhões de dólares americanos.

Os processos de reciclagem e reuso de lixo eletrônico podem ainda auxiliar na redução de emissões de CO₂ na atmosfera, com a diminuição das demandas de energia e combustível, em uma potencial redução estimada em cerca de 15 milhões de toneladas do gás (FORTI ET AL., 2020).

Ainda segundo Forti et al. (2020), mesmo que fosse feito o uso integral destes recursos descartados no lixo eletrônico, ainda haveria a necessidade de mais 14 milhões de toneladas destes mesmos recursos, na forma de material obtido diretamente de fontes primárias (mineração), para cobrir as necessidades da indústria e dos consumidores, o que é uma faceta do crescimento da indústria de equipamentos eletroeletrônicos. Essa situação mostra a necessidade da economia circular, redução/reciclagem/reuso (os “três Rs”) e logística reversa, pois na realidade apenas 17,4% do lixo eletrônico (produzidos mundialmente) foram efetivamente reciclados ou reusados, o que significa que a pressão sobre os recursos naturais foi conseqüentemente bem maior (FORTI ET AL., 2020).

IV. Considerações finais

O lixo eletrônico representa um dos grandes problemas ambientais da atualidade, pois o volume produzido e a demanda crescem anualmente. O descarte direto no ambiente pode levar a problemas de poluição ambientais que impactam de forma negativa nos ecossistemas e na saúde humana. Além disso, a obtenção de matérias-primas e a sua manufatura são igualmente impactantes. O cobre é um material essencial aos produtos eletrônicos, mas sua extração é impactante, gerando contaminação das águas e solo por elementos químicos tóxicos como o cádmio, poluição do ar e água por enxofre (chuvas ácidas), e há grande demanda de energia e água para seu processamento e produção.

O uso de princípios mais sustentáveis nessa indústria representa um meio importante para a mitigação destes problemas, o que deve ser acoplado com uma legislação, informação das partes envolvidas (produtores, comerciantes, consumidores) e tecnologia adequadas. A Economia Circular é um destes princípios, pois permite o reuso de componentes ou a reciclagem de matérias-primas, reduzindo tanto a demanda destas matérias primas como o impactos ambientais de caráter negativo que a obtenção das matérias-primas e manufatura do produto propriamente dito podem causar. Dentro da Economia Circular, a Logística Reversa representa um componente importante, pois permite o retorno do produto descartado pelo usuário aos produtores/recicladores. Como um ciclo fechado, a indústria pode reutilizar o descarte como nova matéria-prima.

Sendo o cobre um elemento comum nos componentes eletrônicos, ele pode ser reusado em componentes reaproveitados ou reciclado, embora recomende-se cuidados pois a reciclagem pode utilizar substâncias como ácidos. Entretanto, a aplicação e operacionalização destas ações ainda está longe de ser perfeita, pois menos de 15% do total de lixo eletrônico produzido no mundo em 2019 foi efetivamente reciclado, e mesmo se ocorresse a reciclagem total, as tendências de crescimento do consumo de produtos eletrônicos ainda exige a obtenção de matéria-prima no meio natural (FORTI ET AL., 2020). Assim, a economia circular é uma importante opção no gerenciamento dos resíduos sólidos eletrônicos, promovendo a redução do consumo de recursos naturais e redução da emissão de poluentes associados ao lixo eletrônico.

References

- [1]. BALDÉ, C.P. et al. : The Global e-Waste Monitor – 2017. United Nations University, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.
- [2]. BOMFIM, Marcela Rebouças. Avaliação dos Impactos Ambientais das Atividades Minerárias. Cruz Das Almas (BA): UFRB, 2017.
- [3]. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos. Programa de proteção e Melhoria da Qualidade Ambiental. IBAMA. Licenciamento Ambiental Federal. Manual de Normas e Procedimentos Para Licenciamento Ambiental no Setor de Extração Mineral. Brasília (DF), 2001.
- [4]. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Consultoria Jurídica. Legislação Ambiental Básica / Ministério do Meio Ambiente. Consultoria Jurídica. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, UNESCO, 2008. Disponível em: <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000161188>
- [5]. BRASIL. Lei 12.305, de 12 de agosto de 2010. 3ª ed. Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017. Disponível em: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUK EwjyvsP1oYv8AhVCpJUCHS_sCtAQFnoECAkQAQ&url=https%3A%2F%2Fbd.camara.leg.br%2Fbd%2Fbitstream%2Fhandle%2Fbdcamara%2F14826%2Fpolitica_residuos_solidos_3ed.reimp.pdf%3Fsequence%3D20%26isAllowed%3Dy&usg=AOvVaw0hsuL0G_uxr8fYmNfkQ-XV
- [6]. CAPAZ, Rafael Silva; NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta (orgs.). Ciências Ambientais Para Engenharia. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [7]. CIMINELLI, Virgínia, Sampaio. T.. Hidrometalurgia. CETEM/MCT, 2007. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/1288>
- [8]. CONDE, Antônio; XAVIER, Lúcia Helena; FRADE, NeuciBiscov. Aspectos Operacionais da Gestão de REEE. In: XAVIER, Lúcia Helena; CARVALHO, Tereza Cristina (orgs.). Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [9]. COSTA, Alexandre Sylvio Vieira. Introdução a Gestão Ambiental. Governador Valadares (MG): Univale Virtual, 2011. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/342154750_Livro_Didatico_-_Introducao_a_Gestao_Ambiental
- [10]. DAMASCENO, Giselle Chagas. Geologia, Mineração e Meio Ambiente. Cruz das Almas (BA): UFRB, 2017.
- [11]. DERR, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J.. An Introduction to the Rock-Forming Minerals. 3ª ed. Londres (Reino Unido): The Mineralogical Society, 2013.
- [12]. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. Towards the Circular Economy. 1 – Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition. 2013. Disponível em: <file:///C:/Users/User/Downloads/Towards%20the%20Circular%20Economy%20Vol.pdf>
- [13]. EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. Circular Economy in Europe – Developing the Knowledge Base. EEA Report 2/2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016. Disponível em: <https://www.eea.europa.eu/publications/circular-economy-in-europe>
- [14]. FARIAS, Carlos Eugênio Gomes. Mineração e Meio Ambiente no Brasil. Brasília: CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2002. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/mineracao_e_meio_ambiente_no_brasil_1022.pdf/e86e431e-1a03-48d0-9a6e-98655ea257b6?version=1.0
- [15]. FERREIRA, J. M. B. e FERREIRA, A. C.. A sociedade da informação e o desafio da sucata eletrônica. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia. Vol. III, Ano 3. São Paulo: Anhanguera Educacional, 2008.
- [16]. FORTI, V. et al.. The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf
- [17]. GERBASE, Annelise Engel, OLIVEIRA, Camila Reis. Reciclagem do Lixo de Informática: Uma Oportunidade Para a Química. Química Nova, Vol. 35, No. 7, p. 1486-1492, 2012.
- [18]. MOI, Paula Cristina Pedroso, et al.. Lixo Eletrônico: Consequências e Possíveis Soluções. Connection Line – Revista Eletrônica da Univag. Número 7. P.37-45, 2012. Disponível em: <https://www.periodicos.univag.com.br/index.php/CONNECTIONLINE/article/view/105/0> DOI: 10.18312/connectionline.v0i7.105
- [19]. MOTA, Suetônio. Introdução a Engenharia Ambiental. 4ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2006.
- [20]. NASCIMENTO, Luis Felipe. Gestão Ambiental e Sustentabilidade. 3ª ed. rev. atual. Florianópolis: Departamento de Ciências da Administração / UFSC; Brasília: CAPES / UAB, 2016. Disponível em:

- <https://educapes.capes.gov.br/bitstream/capes/401188/1/Gestao%20Ambiental%20Sustentabilidade%203ed%20GRAFICA.pdf>
- [21]. NETO, José Chaves. Meio Ambiente e Mineração. Apostila de Meio Ambiente – Curso Técnico em Mineração. Fortaleza (CE): Escola Estadual de Educação profissional (EEEP), 2013.
- [22]. OLIVEIRA, Camila Reis. Alternativas Tecnológicas Para o Tratamento e Reciclagem do Lixo de Informática. Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto à atividade de ensino “Projeto Tecnológico” do Curso de Química Industrial, como requisito parcial para obtenção do grau de Químico Industrial. Porto Alegre (RS), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Química, 2010.
- [23]. REES, William E.. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out. *Environment and Urbanization*, v. 4, n. 2, p. 121–130, 29 out. 1992. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/250060794_Ecological_Footprints_and_Appropriated_Carrying_Capacity_What_Urban_Economics_Leaves_Out/link/552c642c0cf21acb0920d31e/download
- [24]. SANCHEZ, Luis Henrique. Avaliação de Impactos Ambientais: conceitos e métodos. 2ª ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- [25]. SANTOS, Mário Roberto; SHIBAO, Fábio Ytoshi; SILVA, Flavia Cristina. Economia Circular: Conceitos e Aplicação. *Ver. Elet. Gestão e Serviços*. V. 10, n. 2, p. 2808-2826, Jul/Dez. 2019. Disponível em: <https://www.metodista.br/revistas/revistas-metodista/index.php/REGS/article/view/9440>
- [26]. SILVA, Railma Marrone Pereira da. O meio ambiente na Constituição Federal de 1988. *Revista Jus Navigandi*, ISSN 1518-4862, Teresina, ano 18, n. 3759, 16 out. 2013. Disponível em: <https://jus.com.br/artigos/25529>.
- [27]. SILVA, Luciana A., et al.. Cobre: Produção Industrial e Aplicações. *Química Nova*, v. 42, n.10, p. 1154-1161. 2019. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170439>
- [28]. SILVEIRA, Marina Duque. Utilização de Resíduos de Mineração na Construção Civil. Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia da UFMG, Belo Horizonte (MG), 2015.
- [29]. STEIN, R. T.. Recuperação de Áreas Degradadas. Porto Alegre: Sagah, 2017.
- [30]. STEIN, R. T.. Avaliação de Impactos Ambientais. Porto Alegre: Sagah, 2018.
- [31]. STOHRER, Camila Monteiro Santos; PIENIZ, Lisiane Ferreira. Consumo e resíduos eletroeletrônicos: a logística reversa como instrumento do desenvolvimento sustentável. *Revista Eletrônica Direito e Política*, Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Ciência Jurídica da UNIVALI, Itajaí, v.10, n.1, edição especial de 2015. Disponível em: www.univali.br/direitopolitica - ISSN 1980-7791.
- [32]. UFFELE, Alexander C.; BARCHOWSKY, Aaron. Toxic Effects of Metals. In: KLAASSEN, Curtis D. (ed.). Casarett&Doull’s Toxicology: The Basic Science of Poisons. 9ª ed. McGrawHill Education. 2019.
- [33]. UNITED NATIONS. Our Growing Population. 2022. Disponível em: <https://www.un.org/en/global-issues/population>
- [34]. WAGNER, M. et al. Regional E-Waste Monitor for Latin America: Results for 13 Countries Participating in Project UNIDO-GEF 5554. Bonn (Alemanha), 2022. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/regional-e-waste-monitor-for-latin-america-2022/>
- [35]. XAVIER, Lúcia Helena; CARVALHO, Tereza Cristina. Gestão de Resíduos Eletroeletrônicos. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [36]. ZHANG, L. e KRUMDICK, G. K. (Eds.). Recycling of electronic waste II – Proceedings of the second symposium. The Minerals, Metals & Materials Society / Wiley& Sons, Canada, 2011.