

# "De repente do lixo fez-se tanto" [21]

## 1 - INTRODUÇÃO

Atualmente, vivemos um período de intenso avanço tecnológico, o que gera diversas mudanças em nossas vidas, entre elas a necessidade de possuir celulares, computadores e eletrodomésticos. Para entendermos os motivos históricos da dependência tecnológica e percebermos a problemática dessa situação, é relevante analisar o passado de nossa sociedade nos últimos séculos. É a partir da Primeira Revolução Industrial que o modo de produção, antes artesanal, passa a ser ditado pelo ritmo das máquinas, o que leva à produção em massa e a um modelo predatório dos recursos naturais, visto que o objetivo é, essencialmente, o lucro. Ao deixarem de lado as manufaturas, que seguiam o ritmo natural do trabalhador e produziam de acordo com a demanda, as indústrias fabricam mais e geram uma demanda excessiva de consumo. Similarmente, a Terceira Revolução Industrial, afeta a maneira com que lidamos com a produção e o consumo. Com ela, vieram os avanços na área da robótica, da nanotecnologia e das telecomunicações, conectando diferentes regiões do mundo e automatizando ainda mais a indústria. É evidente que, devido à cultura do consumismo e ao marketing agressivo que acompanha o rápido avanço tecnológico industrial, além da obsolescência programada [4] – fenômeno no qual as empresas fabricam eletrônicos com uma vida útil menor do que a esperada –, a troca constante de aparelhos eletroeletrônicos por novos modelos gera um crescente problema socioambiental e econômico, já que o denominado **lixo eletrônico** é de difícil descarte e reciclagem [9].

De acordo com uma pesquisa do The Global E-Waste Monitor, são descartadas mais de 53 milhões de toneladas de equipamentos eletroeletrônicos e pilhas no mundo [8]. Em 2019, por exemplo, foram descartadas pelo menos 2 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos apenas no Brasil, como é possível notar na *figura 1* [1]. Esses resíduos, em sua maior parte, não têm um destino adequado, uma vez que são descartados em

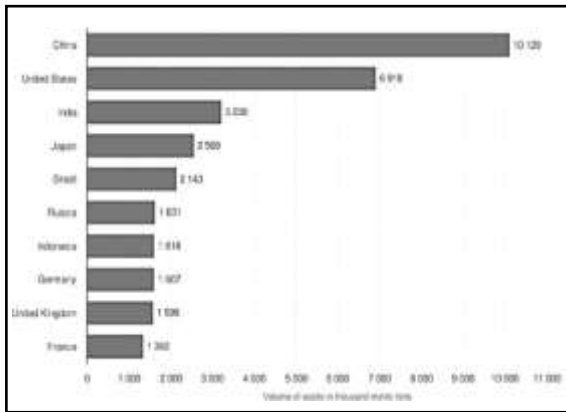


Figura 1 - Os maiores produtores de e-lixo no mundo em 2019

ambientes inseguros, não monitorados e sem possibilidade de encaminhamento para locais que os reutilizem e/ou reciclem.

Primeiramente, é possível perceber um grande problema de caráter ambiental, pois os eletroeletrônicos são constituídos majoritariamente por metais pesados, especialmente chumbo, cromo, cádmio, mercúrio e bário, além de outros resíduos químicos que levam anos para se degradar no solo, como as dioxinas [3] (apresentadas na *figura 2*) e os BFRs, componentes utilizados para inibir os efeitos de combustão e inflamabilidade em polímeros[13]. Todos contaminam solos e rios, destruindo ecossistemas, intoxicando teias e cadeias alimentares, poluindo os lençóis freáticos, acidificando os meios e gerando gases pela combustão, que, muitas vezes, são carcinogênicos e nocivos à saúde. Além disso, quem vive em áreas rurais e urbanas também está exposto aos riscos de contaminação

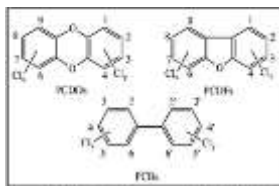


Figura 2 - Estrutura química dos PCDDs, PCDFs e PCBs, exemplos de dioxinas poluentes presentes no e-lixo.

por metais pesados [6], já que os resíduos químicos em lixões e aterros sanitários, por exemplo, podem entrar em contato com a cadeia produtora de alimentos e fontes de água.

Ademais, existe um contratempo relacionado à indústria, dado que a produção e o descarte de eletroeletrônicos aumentaram consideravelmente e a matéria-prima não é facilmente acessível, gerando, portanto, uma verdadeira crise nos setores que dependem desses materiais, como o automotivo e os de produção de smartphones e computadores. Um exemplo disso é de um dos mais importantes componentes para essa indústria: o semicondutor [7], um material capaz de mudar de isolante para condutor de energia elétrica facilmente, sendo muito utilizado na fabricação de chips e constituindo a base de muitos produtos. A falta dessa

matéria-prima foi agravada durante a pandemia da COVID-19, inclusive resultando em empresas como a Honda parando parte de sua produção, já que a demanda por eletrônicos aumentou. Dessa forma, é visível que a maior procura por esses produtos acarreta na diminuição da oferta e no aumento dos preços.

Idealmente, é possível solucionar essa problemática diminuindo o consumo dos eletroeletrônicos e a produção deles, o que reduziria a geração de resíduos. Todavia, uma solução mais viável atualmente é o aumento da reciclagem eficiente e segura do lixo eletrônico para lidar de forma responsável com ele e reutilizar os materiais de difícil acesso em novas produções.

## 2 - RESÍDUOS ELETRÔNICOS NO BRASIL

O contexto de subdesenvolvimento do Brasil é um dos fatores para que o lixo eletrônico se evidencie como um grande e emergente problema no país, já que não há infraestrutura adequada para a reciclagem e o tratamento desse tipo de lixo, e nem conscientização social sobre o tema. A pesquisa citada anteriormente também ressalta que no Brasil pelo menos 16% da população descarta dispositivos eletrônicos no lixo comum e 87% apenas guarda os aparelhos em desuso, enquanto 33% desconhecem completamente áreas para o descarte correto.

Adaptadores em geral
Cartucho de tinta ou toner
Adega
Celulares
Amplificador de áudio
DVD
Antena digital
Resistência elétrica ou eletrônica
Aparelho de aquecimento elétrico para ambiente
Roteador
Aparelho de ar condicionado
Ventilador de teto
Televisão
Cafeteira
Computador
Impressora

Figura 3 - Aparelhos regulamentados para encaminhamento de descarte correto.

Apesar dessas dificuldades, é possível encontrar diversos projetos a favor da reciclagem do lixo no Brasil, e, nos últimos anos, houveram importantes avanços legislativos relacionados à regulamentação do descarte de eletroeletrônicos. [20] Em 02 de agosto de 2010, foi aceito um projeto de lei chamado PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos) que trouxe ao país grandes mudanças quanto ao descarte e destinação do lixo [12]. Ao mesmo tempo, o Conselho Nacional do Meio Ambiente aprovou um projeto de lei que editava resoluções a respeito da logística reversa para cadeias como as de pilhas e baterias. [19] Redigida em 1999, a Resolução Conama nº 401/2008 estabelece os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para seu gerenciamento ambientalmente adequado. [20] Ainda assim, em 12 de fevereiro do ano de 2020, o presidente da república assinou um decreto que obriga empresas que produzem e comercializam

itens que contenham resíduos considerados prejudiciais (Figura 3) ou os próprios resíduos a possuir um sistema de coleta para eles, desde que sejam de uso doméstico – portanto, não incluindo resíduos industriais, de uso profissional ou advindos de grande quantidade.

É fato que a reciclagem de materiais eletroeletrônicos traria diversos benefícios sociais, econômicos e ambientais. Porém, esses processos são de grande dificuldade tanto pela falta de investimento em pesquisas na área quanto pelas suas demandas: os eletrônicos em desuso são, entre si, muito variados em tamanho, tipo, componentes e formato, e, portanto, trazem um empecilho quanto à criação de uma forma única para sua reciclagem. Além disso, nesses dispositivos também há a presença de outros materiais que dificultam a separação dos compostos, como plásticos, cerâmicas e diversas pequenas partes metálicas, que exigem um processo de separação e recuperação muito complexo e minucioso. Embora o Brasil já seja capaz de separar as principais partes do e-lixo, evidencia-se ainda a inexistência de um método para realizar a reciclagem completa das placas de circuito impresso. Portanto, a maior parte do lixo eletrônico coletado no Brasil é exportado e vendido para outros países que possuem a infraestrutura e a tecnologia necessárias.

## 3 - PROCESSOS FÍSICOS E QUÍMICOS PARA RECICLAGEM DO E-LIXO

Primeiramente, quando se diz respeito à reciclagem de resíduos eletrônicos, é importante levar em consideração a natureza desse lixo, que é, em sua grande maioria, de reunião de diversos compostos muito diferentes [11] (como em um notebook ou em um celular, onde é usado desde estanho até silicone). Sendo assim, o primeiro passo para a recuperação do lixo é a separação sistemática de seus componentes, como é possível notar na Figura 4 [17], a partir de, primeiramente, desmontagem manual ou mecânica, separação de todas as partes (que pode ser magnética, gravitacional ou eletrostática) e seu desmantelamento, antes de serem direcionadas para a reciclagem. É relevante mencionar que as indústrias eletrônicas usam toneladas de Au, além de Ag, Pd, Pt, Nb, entre outros materiais que são muito difíceis de separar, dificultando o processo. Posto isso, os segmentos gerados a partir desse primeiro processo irão passar por outros procedimentos que recuperarão os materiais originais.

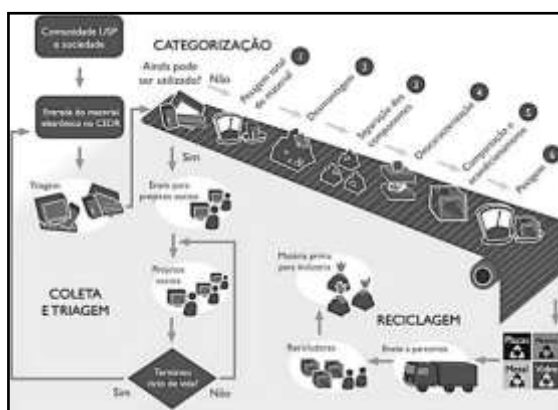


Figura 4 - Fluxograma da coleta e reciclagem de eletrônicos.

Para decompor os componentes do lixo eletrônico em seus químicos originais ou em outros de maior utilidade, converter os BFRs em monômeros, retirar os metais pesados e as substâncias tóxicas e prevenir a formação de dioxinas [3], os processos de reação química por **pirometalurgia** e **hidrometalurgia** são os mais eficientes, além de outros processos como despolimerização, oxidação e gaseificação dos elementos [13]. Dessa forma, a reciclagem por processos químicos irá restaurar as matérias-primas do lixo e possivelmente resultar na

fabricação de combustíveis.

Os processos metalúrgicos são direcionados para a reciclagem do material após a separação de seus componentes, voltada para os estágios de refinamento. A mais comum forma de reciclagem por metalurgia é a pirometalurgia, que consiste em um processo altamente endotérmico de decomposição de compostos químicos através da quebra de ligações químicas das cadeias orgânicas por calor, o qual, por sua vez, não está relacionado ao oxigênio – ou seja, "esquenta sem combustão". Durante esse processo, há a separação dos materiais orgânicos dos metálicos, obtendo-se metais com alta taxa de pureza e decompondo-se os outros materiais. Ocorre, ainda, uma destilação destrutiva de polímeros, que se resume à recuperação das matérias-primas que os compunham e à formação de combustíveis, transformando a matéria orgânica em produtos de baixa massa molecular. Os fluidos derivados da pirólise podem ser usados como combustível e a matéria inorgânica pode ser separada e obtida em sua forma original para reuso. Um grande empecilho nesse procedimento, porém, é o fato de os óleos decorrentes dele poderem possuir muitos precursores de dioxinas [3], o que precisa ser evitado por meio da adição de  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  [13]. Esse processo, porém, dificulta a separação de alguns metais preciosos (como Al e Fe) e gera muitos excedentes de metais pesados, como Hg, Pb e Cd, em forma de emissões gasosas.

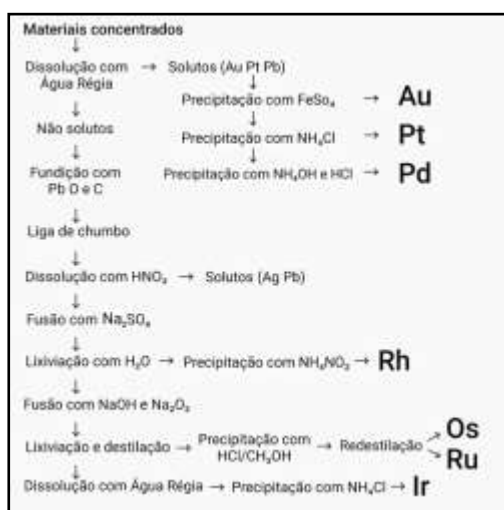


Figura 5 - Processos hidrometalúrgicos.

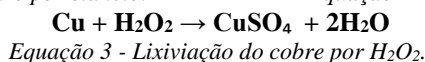
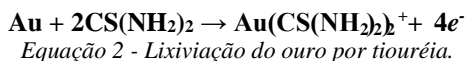
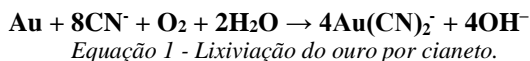
líquida, onde irá acontecer a **lixiviação**, processo baseado na decomposição de materiais e minérios por ação de um agente lixiviante, como ilustra a Figura 5 [18]. Porém, nesse procedimento deve-se tomar muito cuidado com o descarte das soluções reagentes utilizadas durante as reações, que acabam sendo uma grande quantidade e possivelmente tóxicas para o ambiente.



Figura 6 - Parte do processo de hidrometalurgia do Au.

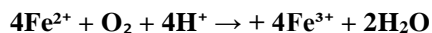
À vista disso, após a remoção dos metais de base, esses são dissolvidos em uma solução de  $\text{HNO}_3$ , e, depois, há a lixiviação, com água régia, do resíduo da primeira etapa para extrair Au, como mostrado na Figura 6 [16]. Porém, pelos reagentes da lixiviação serem altamente corrosivos, a viabilidade industrial desse processo é limitada [13].

Também existem pesquisas sobre outras formas de se realizar esse mesmo processo, porém utilizando reagentes menos corrosivos, como cianeto, haleto, tiouréia, persulfato de potássio e tiosulfato. Assim, temos a reação de lixiviação de Au por cianeto (Equação 1) [13], que é bem menos poluente, e a reação por tiouréia (Equação 2) [13], que pode dissolver até 99% do ouro. Além disso, também se pode utilizar  $\text{H}_2\text{O}_2$  para aumentar a taxa de recuperação de Cu e Ag (Equação 3) [13].

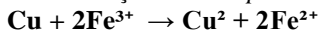


Ademais, existem outros processos sendo estudados em que são utilizados microorganismos para realizar a extração dos metais por meio da geração de ácidos fracos, que vem sendo chamado de **biohidrometalurgia**, ou biolixiviação [13]. Essa metodologia possui grande importância quanto às pesquisas na área de sustentabilidade ambiental, pois não produz resíduos inorgânicos tóxicos ou perigosos para a saúde da natureza. Ou seja, a biolixiviação permite a recuperação específica de metais por microorganismos liberando apenas resíduos não metálicos e não poluentes, apresentando uma solução para extração de metais de lixo eletrônico com muito menos impacto ambiental, menor consumo de energia e maior controle das reações do que

nos processos tradicionais de pirometalurgia e hidrometalurgia. Algumas bactérias, como as do gênero *Thiobacillus*, e alguns fungos, como *Aspergillus Niger*, são capazes de realizar essas funções, principalmente por meio da oxidação de metais, como no exemplo do  $Fe^{2+}$ , que é bio-oxidado por bactérias formando  $Fe^{3+}$ , que pode ser utilizado, por exemplo, na separação de Cu, como ilustram as *Equações 4 e 5* [13].



*Equação 4 - Oxidação do  $Fe^{2+}$  por bactérias.*



*Equação 5 - Recuperação de Cu por lixiviação utilizando  $Fe^{3+}$  oxidado.*

#### 4 - CONCLUSÃO

Por fim, é evidente que a urbanização e a industrialização aumentaram a produção de eletroeletrônicos, que, por sua vez, estão sendo descartados cada vez mais rápido e em maior quantidade, gerando o enorme problema do **e-lixo** ao redor de todo o mundo. Esse lixo eletrônico se torna, portanto, uma das maiores fontes de metais pesados sem tratamento efetivo, que coloca a natureza em risco cada vez mais. Por isso, primeiramente é necessário haver uma diminuição no consumo e na produção desses aparelhos. Ademais, a reutilização e reciclagem desses produtos são extremamente benéficas, tanto para o meio ambiente, quanto para as indústrias. Porém, para que seja realizada propriamente a reciclagem desses compostos, é necessário que a responsabilidade por esse serviço saia do setor informal de trabalho e seja mais regulamentada no Brasil, de modo que nosso país possa realizar processos de reciclagem completa de seus próprios resíduos eletroeletrônicos. Para isso, são indispensáveis maiores investimentos na conscientização pública e na criação de pontos de coleta de lixo eletrônico em todas as cidades brasileiras, além de um aumento da verba destinada ao Ministério da Agricultura, responsável pelo que está relacionado ao impacto do lixo na natureza. Lixo eletrônico não deve ser despejado em lixões, aterros, parques, ruas ou praças, ele é um recurso crucial para a nossa sociedade e deve obter o tratamento ideal para que "seus malefícios se tornem benefícios".

#### 5 - REFERÊNCIAS

- [1] Disponível em: <<http://cdn.statcdn.com/Infographic/images/normal/17175.jpeg>> Acesso em: 12 mar. 2022.
- [2] Disponível em: <<https://docs.google.com/viewerng/viewer?url=https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/viewFile/559/389>> Acesso em: 12 mar. 2022.
- [3] Disponível em: <<http://www.soliftec.com/dioxins.pdf>> Acesso em: 13 mar. 2022.
- [4] Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X16304299>>. Acesso em: 21 mar.2022.
- [5] Disponível em: <<https://youtu.be/lqxwnmlUuts>> Acesso em: 21 mar. 2022.
- [6] Disponível em: <<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1878029616301542?token=9A2C27442B7A250184FDC2FB3E73E684A96E9D6A8EA571E68E9B28662B84DC08F6139D5B8E2EB80E86C76E59459BBACD&originRegion=us-east-1&originCreation=20220311210315>> Acesso em: 11 mar.2022.
- [7] Disponível em: <<https://tlo.mit.edu/technologies/recycling-compound-semiconductor-photovoltaics-means-ambipolar-electrolysis#:~:text=The%20invention%20provides%20a%20new.glass%20and%20metal%20wire%20contacts>> Acesso em: 5 mar.2022.
- [8] Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2021/03/17/falta-de-chips-afeta-industria-global-e-crise-e-sem-precedentes-diz-associacao-chinesa-do-setor.ghtml>> Acesso em: 11 mar. 2022.
- [9] Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2021-10/brasil-e-o-quinto-maior-produtor-de-lixo-eletronico#:~:text=Na%20outra%20ponta%2C%20o%20n%C3%BAmero,pela%20Universidade%20das%20Na%C3%A7%C3%B5es%20Unidas>> Acesso em: 5 mar. 2022.
- [10] Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2011/III-020.pdf>> Acesso em: 12 mar. 2022.
- [11] Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/produtos/37275-como-os-principais-componentes-de-eletronicos-sao-reciclados-.htm>> Acesso em: 6 mar. 2022.
- [12] Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096>> Acesso em: 6 mar. 2022.
- [13] Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214999614003208>> Acesso em: 1 mar. 2022.
- [14] Disponível em: <<https://conexaoplaneta.com.br/blog/medalhas-das-olimpiadas-do-japao-serao-feitas-com-celulares-e-lixo-eletronico-reciclados/>> Acesso em: 2 mar. 2022.
- [15] Disponível em: <[https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-19042011-100037/publico/Tese\\_Viviane\\_Tavares\\_de\\_Morares.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-19042011-100037/publico/Tese_Viviane_Tavares_de_Morares.pdf)> Acesso em: 19 mar. 2022.
- [16] Disponível em: <<https://youtu.be/hAkWMDrLXmo>> Acesso em: 19 mar. 2022.
- [17] Disponível em: <<https://www5.usp.br/noticias/meio-ambiente/lixo-eletronico-o-que-fazer-com-ele/>> Acesso em: 19 mar. 2022.
- [18] Disponível em: <<https://youtu.be/EFzBAT6N338>> Acesso em: 20 mar. 2022.
- [19] Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br/residuos/control-de-residuos/politica-nacional-de-residuos-solidos-pnrs>> Acesso em: 6 mar. 2022.
- [20] Disponível em: <<https://www.vgresiduos.com.br/blog/logistica-reversa-de-eletronicos-o-que-diz-o-novo-decreto#:~:text=Em%2012%20de%20fevereiro%20de,e%20dar%20sua%20destina%C3%A7%C3%A3o%20correta>> Acesso em: 6 mar. 2022.