

PROCESSOS QUÍMICOS PARA RECICLAGEM DO E-LIXO

“Para a ganância, toda a natureza é insuficiente”

(SÊNECA, Lúcio)

É inegável que, cada dia mais, o homem contemporâneo necessita estar conectado com o mundo por meio de eletrônicos. Concatenadas a essa necessidade, advêm as propagandas que seduzem o consumidor a comprar um produto mais atual, mesmo sem precisar. Quando a propaganda não é capaz de submeter a população às práticas consumistas, a indústria ainda se utiliza de trunfos como a obsolescência programada – escolha proposital do produtor de definir um tempo máximo de vida útil do produto, forçando o consumidor a comprar outro mais recente. A grande problemática relacionada a esse consumismo exacerbado de equipamentos elétricos e eletrônicos é: o que acontece com os equipamentos antigos que foram substituídos?

De acordo com Universidade das Nações Unidas (UNU), durante o ano de 2019, 53,6 milhões e toneladas de REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos) foram gerados, sendo que apenas 9,3 milhões de toneladas foram reciclados – 17,4% da quantidade gerada [1]. O fato de que a produção do e-lixo é muito superior à sua reciclagem é alarmante tanto no âmbito econômico, já que, segundo a UNU, a quantidade de lixo eletrônico gerado em 2019 tem o valor estimado de US\$ 57 bilhões [1], quanto no âmbito biológico e da saúde, devido à composição dos REEE que apresenta diversos metais pesados nocivos à saúde humana, como também ao solo, fauna e flora do ecossistema. A tabela 1 retrata a composição dos principais elementos metálicos em diferentes REEE.

Tabela 1. Composição dos principais elementos metálicos em diferentes REEE [2].

Origem do REEE	Composição em massa (%)					(ppm)		
	Fe	Cu	Al	Pb	Ni	Ag	Au	Pd
Sucata eletrônica típica (SUM, 1991)	8	20	2	2	2	2000	1000	50
Calculadora (sem bateria) (HAGELÜKEN, 2006)	4	3	5	0,1	0,5	260	50	5
Aparelho de DVD (HAGELÜKEN, 2006)	62	5	2	0,3	0,05	115	15	4
TV – PCI (HAGELÜKEN, 2006)	28	10	10	1	0,3	280	20	10
Computador – PCI (HAGELÜKEN, 2006)	7	20	5	1,5	1	1000	250	110
Computador – PCI (YAMANE et al., 2011)	7,33	20,19	5,7	5,53	0,43	1600	1300	-
Celular (HAGELÜKEN, 2006)	5	13	1	0,3	0,1	1380	350	210
Celular – PCI (YAMANE et al., 2011)	10,57	34,49	0,26	1,87	10,57	2100	*	-

O símbolo “-” denota que o teor do metal não foi determinado.

* abaixo do limite de detecção do equipamento (inferior a 0,5 ppm na amostra analisada, independentemente se foi diluída ou não previamente à análise).

A priori, a melhor forma de reduzir os danos causados pelo lixo eletrônico é diminuir a quantidade de REEE. Para isso, é necessária a reciclagem desse material. Contudo, reciclar eletrônicos é uma tarefa árdua, pois eles são compostos por diversos materiais com características muito diferentes entre si. Na tabela 2, estão representados os tipos de materiais constituintes dos REEE e suas respectivas quantidades.

Tabela 2. Materiais constituintes dos diversos REEE [3].

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%

Por conta disso, faz-se necessária a divisão do processo de reciclagem em diversas partes, como diagramado na Figura 1 [4], para que a separação das matérias-primas seja efetiva e possibilite sua reutilização. O início do processo se dá pela coleta dos REEE, desmanche do aparelho e divisão de componentes. Em seguida, os componentes reutilizados voltam para a indústria, enquanto os não-reutilizáveis têm o seu tamanho reduzido mais ainda e podem ser submetidos ao método de “triagem por gravidade e flotação com espuma”, que tem como objetivo separar as impurezas dos metais.

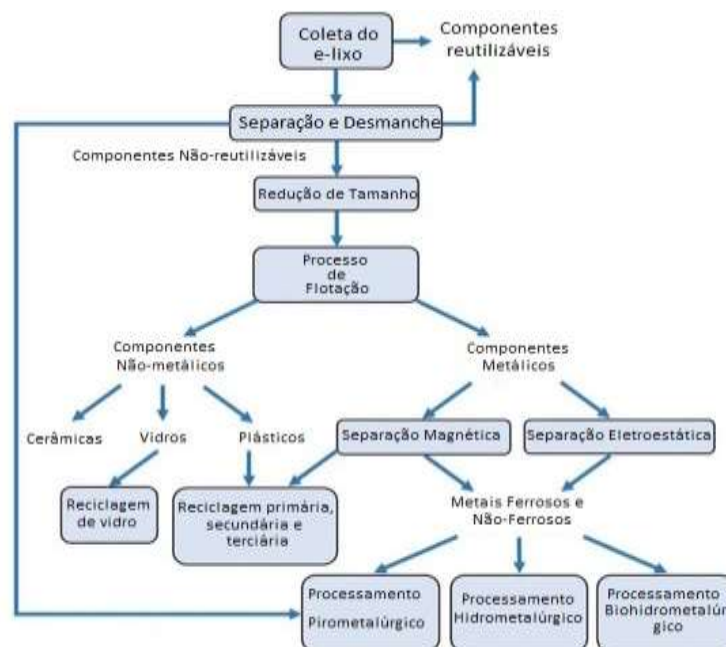


Figura 1: Fluxograma do processo de reciclagem do lixo eletrônico [4, Adaptado].

Depois desse procedimento, os metais ferrosos e não-ferrosos são submetidos a um dos três processos seguintes: pirometalúrgico, hidrometalúrgico ou biohidrometalúrgico.

O processamento pirometalúrgico consiste na utilização de altas temperaturas com a finalidade de fundir o metal e evaporar substâncias que o tornam impuro. Contudo, esse processo de aquecimento de metais apresenta dois problemas principais, sendo o primeiro o seu custo elevado, já que utiliza altas quantidades de energia, e o segundo, a emissão de gases como o SO₂, associado ao fenômeno da chuva ácida [5].

No processamento hidrometalúrgico, trata-se de submeter o metal ao processo de lixiviação que “consiste na dissolução seletiva de minerais contendo o metal ou metais de interesse através do contato do sólido (minério ou concentrado) com uma fase aquosa que pode conter ácidos, bases ou agentes complexantes” [6], para que se obtenha um produto metálico mais puro.

Um exemplo promissor de aplicabilidade da hidrometalurgia é a recuperação do zinco e manganês presentes em pilhas alcalinas e zinco-carbono. Para esse procedimento, é feito o desmanche das baterias, bem como, a separação do material interno para que ele seja seco e, posteriormente, moído. A lixiviação do substrato obtido da moagem pode ser feita “utilizando uma solução de $H_2SO_4(aq)$ 5% v/v e H_2O_2 4% v/v, em um balão de destilação sob refluxo com agitação contínua, por 2 horas à temperatura constante de $60^\circ C$ ” [7], como demonstrado na Figura 2. O processo de lixiviação usando as substâncias citadas pode ser representado pelas seguintes equações [7]:



Figura 2. Esquema do sistema de refluxo utilizado na lixiviação da bateria alcalina [7].

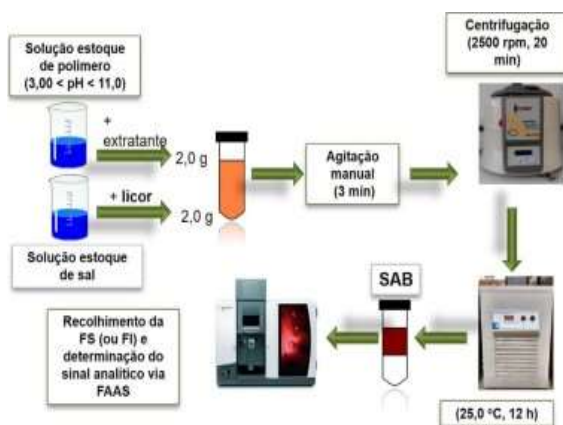
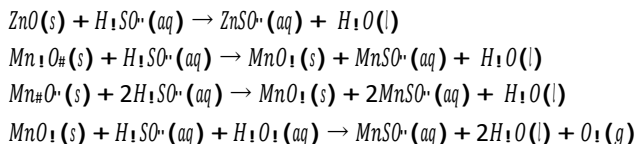


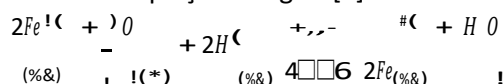
Figura 3. Representação esquemática do processo de extração de Zn e Mn provenientes de baterias alcalinas, utilizando-se do SAB [7].

Seguidamente, um Sistema Aquático Bifásico (SAB) pode ser utilizado como método de recuperação/separação de Zn e Mn oriundos de baterias alcalinas, como esquematizado na Figura 3 [7]. Para este propósito, o licor gerado pela lixiviação, após ser diluído, é utilizado como solvente para as soluções de sal. Paralelamente, a solução de copolímero (L64) é solvente do extratante (ditizona), responsável pela formação de um complexo com o analito de interesse, fazendo com que essa substância formada seja particionada para a fase superior do sistema [7].

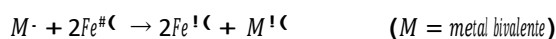
Baseado no método de extração em uma etapa apresentado, no qual utiliza-se SAB L64 + Na_2SO_4 + H_2O ,

na presença de ditizona em pH 3, “a extração seletiva de Zn(II) e Mn(II) (provenientes de baterias alcalinas esgotadas) apresentou-se eficiente, atingindo um fator de separação $S_{\#S/\&S} = 1,2 \times 10^4$ ” [7]. Dessa forma, é possível dizer que esse processo de Hidrometalurgia para tratamento de e-lixo atende aos princípios da “Química Verde” ao passo que “o SAB é composto, majoritariamente, por água e reagentes não tóxicos, não-inflamáveis e biodegradáveis” [7].

O processamento biohidrometalúrgico é referente à utilização de colônias bacterianas no processo de lixiviação, em que há dissolução seletiva de minerais por meio de bactérias como *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans* que são capazes de oxidar o Fe^{2+} presente no metal impuro, convertendo-o em Fe^{3+} , como mostrado na equação a seguir [8].



“Em seguida, o íon, por ser um agente oxidante forte, é capaz de oxidar e solubilizar os metais presentes no resíduo” [8], como na equação a seguir:



De acordo com o relatório “*The Global E-waste Monitor*” divulgado pela UNU, o Brasil é o quinto país que mais gera REEE no mundo, produzindo mais de 2 milhões de toneladas, sendo que menos de 3% desse montante é reciclado [1]. Esses dados demonstram que, mesmo com a existência de medidas como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) [9], que atribui ao produtor o dever de receber do consumidor o produto - após o uso – e descartá-lo de forma correta, ainda falta incentivo governamental para a divulgação de informações apropriadas sobre métodos de reciclagem do e-lixo.

Por isso, urge ao Estado que divulgue informações referentes aos malefícios, formas de remediação dos danos que já foram causados e como prevenir o crescimento dos REEE. Para isso, é importante suscitar os meios de processamento de metais citados, já que, mesmo com os seus defeitos, a implementação deles é economicamente e ambientalmente proveitosa. Ademais, os processamentos hidrometalúrgicos e biohidrometalúrgico apresentam grandes prós, como o baixo impacto ambiental e alto custo-benefício. Contudo, essas metodologias não são aplicadas em grande escala devido, principalmente, a falta de investimento na aplicação dessas tecnologias nas grandes indústrias.

Desse modo, enquanto não houver investimento na reciclagem do lixo eletrônico, nunca seremos capazes de sair dos >3% [1] e, por conseguinte, seremos subjugados pelo crescimento anual de 4% no número de dispositivos no mundo que levará a um ciclo ainda maior de consumismo. Logo, diante dos fatos expostos, evidencia-se a importância da reciclagem do lixo eletrônico que proverá para a sociedade futura maior dinamismo econômico e sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

1. UNU, 2020. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flow and circular economy potential.** <https://collections.unu.edu/view/UNU:7737#viewAttachments>. Acesso em: 04 mar. 2022.
2. RAMUNNO, Franco. **Estudo cinético da lixiviação de metais de placas de circuito impresso obsoletas.** 2015. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.
3. GERBASE, Annelise Engel; OLIVEIRA, Camila Reis de. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. **Química Nova**, v. 35, n. 7, 2012.
4. KHALIQ, A. *et al.* Metal extraction processes for electronic waste and existing industrial routes. **Resources**, v. 3, n. 1, p. 152-179, 2014.
5. HSU, Emily *et al.* Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: a review of metal extraction and recovery technologies. **Green Chemistry**, v. 21, n. 5, p. 919-936, 2019.
6. SOUZA, José Inácio da. **Introdução a Hidrometalurgia.** 2013. Disponível em: https://educacaoprofissional.seduc.ce.gov.br/images/material_didatico/mineracao/mineracao_introducao_a_hidrometalurgia.pdf. Acesso em: 04 mar. 2022.
7. LEITE, Daniela da Silveira. **Desenvolvimento de novas rotas "verdes" hidrometalúrgicas para recuperação de metais a partir de lixo eletrônico.** 2019. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Departamento de Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
8. SILVAS, Flávia Paulucci Cianga. **Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso.** 2014. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
9. BRASIL, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/12305.htm. Acesso em: 04 mar. 2022.