

## Reciclagem do lixo eletrônico: bactérias mineradoras

As inovações tecnológicas estão cada vez mais presentes no cotidiano dos indivíduos – e também no lixo gerado. O lixo eletrônico, também chamado de e-lixo ou REEE (Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos), engloba aparelhos, peças e acessórios que são descartados pelos usuários <sup>[1]</sup>. Associado a fatores como o consumismo e a obsolescência programada, o aumento da geração desses resíduos é uma questão preocupante. Pela presença de compostos bioacumulativos, tais como metais pesados (Pb, Cu, Zn, Hg, Cd) e alumínio, além de plásticos PVC, o descarte inadequado desse tipo de lixo oferece sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Entre os impactos, podem-se citar a poluição do ar pela queima dos polímeros; risco de câncer pelo contato com metais tóxicos e a poluição do solo e do lençol freático <sup>[2][3]</sup>.

A despeito das consequências apresentadas, a maior parte do lixo eletrônico produzido pelos países centrais é enviada ilegalmente a nações subdesenvolvidas, conforme indica um levantamento realizado pela Organização Internacional do Trabalho (OIT) <sup>[4]</sup>. Nesses destinos, o e-lixo é armazenado, majoritariamente, a céu aberto, sendo manuseado por trabalhadores informais sem a proteção adequada. Em contrapartida, segundo o mesmo relatório da OIT, somente 20% desses resíduos são devidamente reciclados <sup>[4]</sup>, o que indica a carência de abordagem e pesquisas a respeito do assunto. No Brasil, os números são ainda menores: menos de 3% do lixo eletrônico passa pelo processo de reciclagem, de acordo com o *The Global E-waste Monitor* <sup>[5]</sup>.

Considerando os fatos apresentados, conclui-se que é de suma importância o investimento em técnicas de reciclagem dos REEEs, a fim de minimizar as consequências negativas e explorar o potencial econômico dos compostos neles presentes. Um dos componentes mais rentáveis dos eletrônicos são as placas de circuito impresso (PCIs), existentes na maioria dos aparelhos. Além da presença de materiais poliméricos e cerâmicos, as PCIs possuem cerca de 30% em massa de metais, de notável relevância comercial <sup>[6]</sup>. Aqui, destacam-se duas categorias: metais base e metais preciosos. Dentre os metais básicos, há o cobre (Cu), ferro



Exemplo de descarte incorreto de lixo eletrônico, no Alabama (EUA) <sup>[8]</sup>

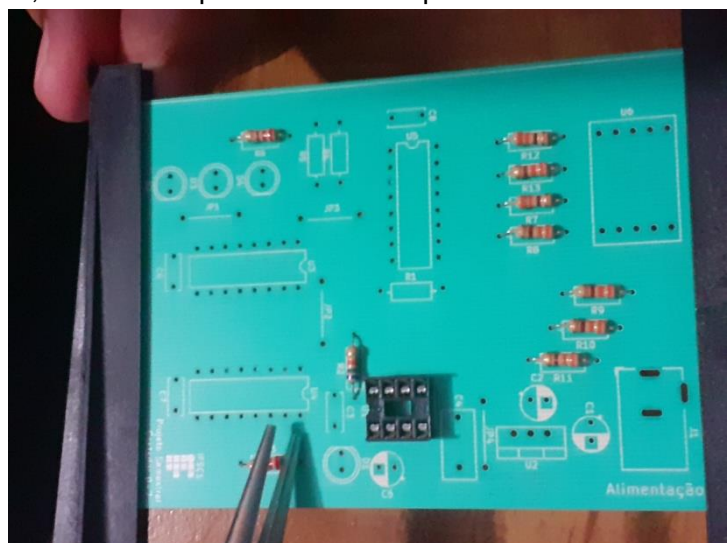


Figura de uma placa de circuito impresso <sup>[9]</sup>

(Fe) e alumínio (Al). Haja vista a sua maleabilidade, condutibilidade elétrica e térmica, dureza e resistência à corrosão, são largamente utilizados na indústria siderúrgica e na construção civil para a fabricação de fios condutores, ligas e estruturas metálicas, além de constituírem inúmeros bens de consumo. No grupo dos metais nobres, tem-se o ouro (Au) e a prata (Ag). Embora encontrados em menor quantidade nas PCs, agregam a maior parte de seu valor econômico [6].



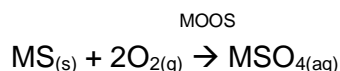
*Ouro extraído de resíduos eletrônicos [10]*

Para a retirada dos metais presentes nas PCs, uma das técnicas mais promissoras é a biolixiviação, utilizada na biohidrometalurgia. A lixiviação consiste em um processo de separação de misturas sólido/líquido, na qual um agente lixiviante (que pode ser um ácido ou até mesmo a água) provoca

a solubilização de um determinado composto e sua extração. Esse fenômeno pode ser observado de forma natural (como ocorre em solos desmatados) ou de uma maneira induzida, para fins específicos. No caso da reciclagem das PCs, os agentes lixiviantes mais utilizados são os ácidos, na hidrometalurgia. Na biohidrometalurgia, por sua vez, os responsáveis por essa solubilização são os microrganismos, que oxidam o substrato [6].

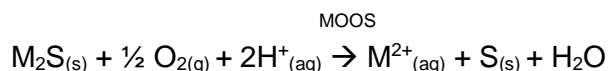
Nos EUA, a biolixiviação é aplicada de maneira considerável para a obtenção de cobre em reservas minerais. No entanto, ela não é empregada de forma expressiva, a nível comercial, para o tratamento de componentes eletrônicos. Haja vista suas vantagens ambientais e econômicas sobre a lixiviação tradicional, países europeus estão desenvolvendo um projeto de fomento a pesquisas na área da biotecnologia, a fim de aprimorar o conhecimento acerca dessa ferramenta [6].

De uma forma geral, o mecanismo de biolixiviação é baseado, no caso de minérios sulfetados, na oxidação do  $Fe^{2+}$  e dos compostos sulfurados, segundo a seguinte equação global [6]:

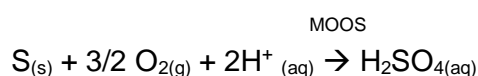


*Equação 1, em que MOOS indica a ação dos microrganismos, e M é um composto genérico*

A interferência bacteriana pode ser direta ou indireta. Na ação direta, as bactérias interagem diretamente com o substrato, formando um biofilme. A oxidação resulta na separação do minério e na formação de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) [6]:

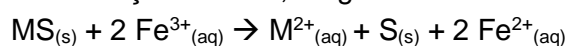


*Equação 2*



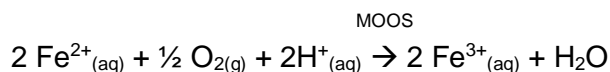
*Equação 3*

Na lixiviação indireta, o agente oxidante é o íon  $Fe^{3+}$ , conforme a equação:



#### Equação 4

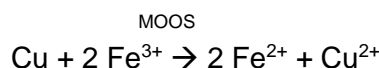
As bactérias então regeneram o cátion  $\text{Fe}^{3+}$ , gerando uma retroalimentação:



#### Equação 5

Para o entendimento da aplicação nos REEes, pode-se utilizar como exemplo a recuperação do cobre proveniente de PCIs de impressoras [7]. No experimento analisado, a bactéria utilizada foi a *Acidithiobacillusferrooxidans*. Após a inoculação e a adaptação do microrganismo às PCIs, o inóculo foi inserido em um meio de cultura T&K (desenvolvido pelos cientistas Tuovinen e Kelly, ideal para casos como esse) e colocado em uma incubadora orbital. A observação durou 15 dias.

As reações ocorridas são muito semelhantes às que ocorrem no caso dos minérios, com a diferença de que não há sulfetos nos resíduos eletrônicos. Dessa forma, o cátion  $\text{Fe}^{3+}$ , por apresentar um elevado potencial de oxirredução ( $E_h = 0,77 \text{ V}$ ), foi capaz de oxidar e extrair o metal Cu da PCI [6]:



#### Equação 6

As bactérias, por sua vez, regeneraram o  $\text{Fe}^{3+}$ , como indicado na equação 5. Certos compostos orgânicos liberados pelos microrganismos também contribuem para diminuir o pH, facilitando a solubilização do Cu. O pH do experimento em questão, após a estabilização, atingiu 1,8 [7].

Como resultado, observou-se a extração de 100% do cobre das PCIs, em oito dias, demonstrando a elevada eficiência do processo [7].

Em suma, é indiscutível a importância da reciclagem dos resíduos de equipamentos eletrônicos, considerando a velocidade em que são geradas as inovações tecnológicas nos últimos tempos. Os componentes existentes nos REEes, além de serem fontes de riscos significativos ao organismo humano e à natureza, possuem um elevado valor agregado, sendo sua recuperação favorável do ponto de vista econômico e ambiental. A aplicação da biohidrometalurgia para extrair metais das placas de circuito impresso, oferecendo um baixo impacto ambiental e rendimento de até 100%, mostra-se uma técnica promissora para um futuro próximo. Através do investimento público em pesquisas no ramo da química e da biotecnologia, será possível um maior aproveitamento do e-lixo e das reservas minerais, construindo-se um mundo mais sustentável – e mais limpo.

#### Referências bibliográficas:

[1] Resíduo eletrônico. **Wikipédia, a enciclopédia livre**. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Res%C3%ADduo\\_eletr%C3%B4nico](https://pt.wikipedia.org/wiki/Res%C3%ADduo_eletr%C3%B4nico). Acesso em: 13 jan. 2022.

[2] KITAJIMA, Luiz Fernando Whitaker et al. **A Educação Ambiental Como Instrumento na Administração dos Problemas do Lixo Eletrônico: Uma Proposta**. São Paulo: RevBEA, 2019. Disponível em: <https://periodicos.unifesp.br/index.php/revbea/article/view/2660/7071>. Acesso em: 19 jan. 2022.

[3] GOIS, Daniel; BRUNO, Gabriel; ALONSO, Marcela. Descarte incorreto de lixo eletrônico traz risco de câncer e problemas ambientais. **G1**, 2019. Disponível em:

<https://g1.globo.com/sp/santos-regiao/educacao/noticia/2019/06/15/descarte-incorreto-de-lixo-eletronico-traz-risco-de-cancer-e-problemas-ambientais.ghtml>. Acesso em: 19 jan. 2022.

[4] OIT: somente 20% do lixo eletrônico é reciclado formalmente. **ONU News**, 2019. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2019/04/1668641>. Acesso em: 19 jan. 2022.

[5] CHABALGOITY, Gabriela; BERNARDES, Gabriela. Brasil recicla menos de 3% do lixo eletrônico. **Correio Braziliense**, 2021. Disponível em: <https://www.correiobraziliense.com.br/brasil/2021/10/4953982-brasil-recicla-menos-de-3-do-lixo-eletronico.html>. Acesso em: 19 jan. 2022.

[6] SILVAS, Flávia Paulucci Cianga. **Utilização de hidrometalurgia e biohidrometalurgia para reciclagem de placas de circuito impresso**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Escola Politécnica, University of São Paulo, São Paulo, 2014. doi:10.11606/T.3.2014.tde-28082015-114810. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-28082015-114810/publico/Tese\\_FlaviaPaulucciCiangaSilvas.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-28082015-114810/publico/Tese_FlaviaPaulucciCiangaSilvas.pdf). Acesso em: 20 jan. 2022.

[7] Utimura, Solange Kazue; Botelho Junior, Amilton Barbosa; Tenório, Jorge Alberto Soares; Espinosa, Denise Croce Romano. **Biohidrometalurgia: Recuperação de Cobre Proveniente de REEE Através da Lixiviação Bacteriana**, p. 1429-1437. In: 73º Congresso Anual da ABM, São Paulo, 2018. Disponível em: <https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/biohidrometalurgia-recuperao-de-cobre-proveniente-de-reee-atravs-da-lixiviao-bacteriana>. Acesso em: 30 jan. 2022.

[8] Imagem de um depósito de lixo eletrônico. **Wikimedia Commons**. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electronic\\_waste.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Electronic_waste.jpg). Acesso em: 02 mar. 2022.

[9] Imagem de uma placa de circuito impresso. **Wikimedia Commons**. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circuito\\_Impresso\\_IFSC\\_1\\_\(51121417154\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Circuito_Impresso_IFSC_1_(51121417154).jpg). Acesso em: 02 mar. 2022.

[10] Imagem de ouro extraído de lixo eletrônico. **Wikimedia Commons**. Disponível em: [https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:M%C3%A3o\\_de\\_Ouro\\_eletr%C3%B4nico.jpg](https://commons.m.wikimedia.org/wiki/File:M%C3%A3o_de_Ouro_eletr%C3%B4nico.jpg). Acesso em: 02 mar. 2022.