

Título: O papel dos micróbios na reciclagem do lixo eletrônico

Cada produto eletrônico ou elétrico que entra no mercado, não importando a que é destinado, eventualmente se torna lixo quando termina a sua “vida útil”: é o chamado e-lixo (e-waste), dispositivos eletrônicos que perderam a utilidade, se tornaram obsoletos ou não funcionais. Estes dispositivos podem ser celulares, lâmpadas, geladeiras e outros tantos produtos ubíquos na sociedade atual; também entram na categoria os aparelhos de uso industrial. A velocidade com que a tecnologia avança hoje em dia, assim como a crescente demanda pelos produtos mais modernos em todo o mundo, faz com que o tempo de uso desses aparelhos seja cada vez mais curto. Por isso, não é à toa que o lixo eletrônico é o tipo de lixo que mais cresce a cada ano.

Dispositivos e equipamentos eletroeletrônicos são bastante complexos: como mostra a Figura 1, mais de 69 elementos da tabela periódica podem ser encontrados neles, incluindo metais preciosos e os chamados *critical raw materials* (CRM), determinados pela Comissão Europeia como matérias-primas para as quais não há nenhum substituto viável e cuja oferta é dominada por poucos produtores. O valor desses materiais contidos no lixo foi estimado como sendo de aproximadamente 57 bilhões de dólares americanos, valor também referente ao ano de 2019¹. Nesse sentido, ampliando a coleta de lixo eletrônico e a reciclagem de forma global, uma parte substancial de matérias-primas secundárias poderia ser re-inserida no processo produtivo, reduzindo, assim, a extração desses materiais da natureza. É importante destacar, no entanto, que essa porção não seria suficiente para suprir a demanda por materiais como ferro, alumínio e cobre na manufatura de novos eletrônicos. A propósito, o mercado desses produtos é tão crescente que, mesmo se todos esses materiais fossem reciclados, a lacuna a ser preenchida pela demanda seria ainda grande.

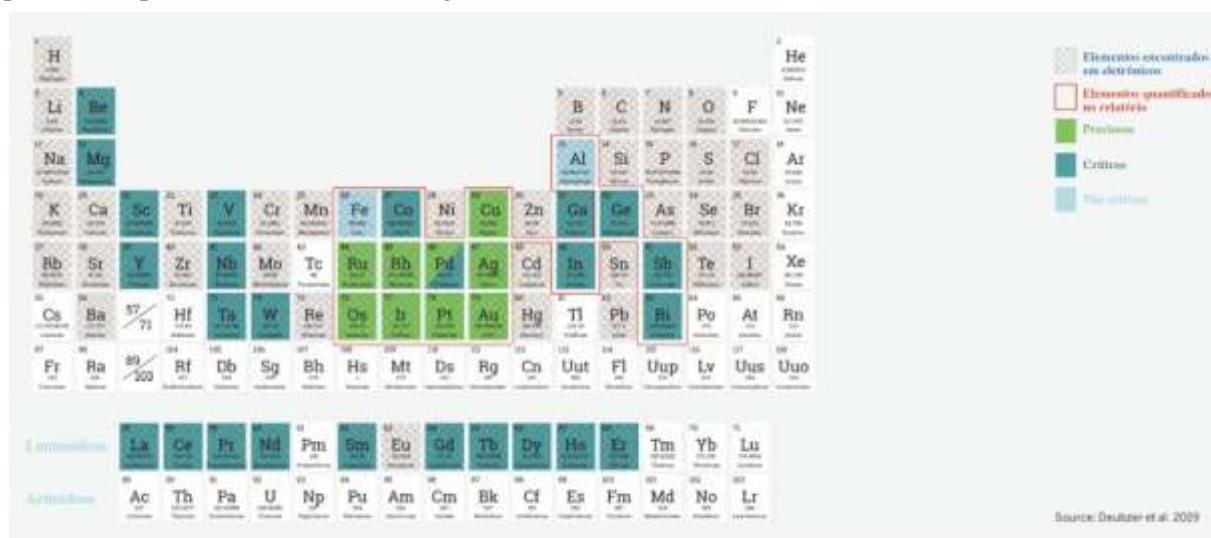


Figura 1: Tabela periódica mostrando os elementos químicos encontrados em equipamentos eletroeletrônicos, incluindo os preciosos e críticos, determinados pela European Commission. Fonte: United Nations Institute for Training and Research. [1]

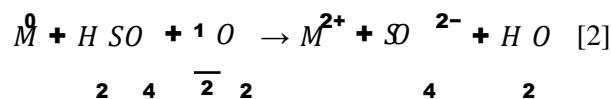
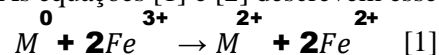
Ademais, eletrônicos e elétricos contêm elementos tóxicos, como metais pesados (chumbo, mercúrio e cádmio, por exemplo); retardantes de chama e, além disso, compostos como clorofluorcarbonetos (CFCs), hidrofluorcarbonetos (HCFCs) podem também ser encontrados no lixo eletrônico — principalmente em ar-condicionados e geladeiras — atual.

Fica evidente, portanto, a necessidade de reciclar tanto lixo eletrônico quanto for possível. Ainda assim, visto os danos que certos materiais na composição desses resíduos podem causar tanto à vida como ao meio ambiente, a escolha dos métodos de reciclagem que devem ser priorizados não pode ser negligenciada. Fato é que o lixo eletrônico tem diversos destinos atualmente; salienta-se que apenas 17,4% desse lixo gerado no mundo todo em 2019 foi documentado, coletado e reciclado apropriadamente, o que equivale a 9,3 Mt (megatoneladas) de lixo de um total de 53,6 Mt.¹

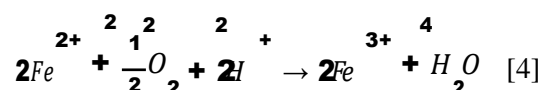
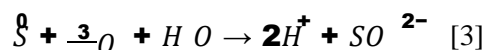
Geralmente, a primeira etapa da reciclagem do lixo eletrônico é a desmontagem manual, em que determinados componentes como placas de circuito impresso, cabos, baterias e cinescópios são separados. Esses componentes podem ser classificados de acordo com alguns aspectos, tais como densidade, tamanho, condutividade elétrica e suscetibilidade magnética. Em seguida, para a recuperação dos metais, o material passa por formas de processamento específicas, sendo as mais tradicionais os processos de hidrometalurgia, eletrometalurgia e pirometalurgia. Entretanto, essas tecnologias convencionais de reciclagem geram impactos ambientais negativos de forma considerável. Diante disso, destaca-se que, recentemente, as técnicas biometalúrgicas de recuperação de metais — que utilizam microrganismos — são vistas como uma alternativa mais sustentável para a reciclagem dos metais de interesse, uma vez que, no processo, o consumo energético é baixo e os reagentes envolvidos não são tóxicos; além disso, o custo das necessidades de instalação e operação são menores em comparação com as outras técnicas convencionais, corroborando uma ótima relação custo-benefício.²

As principais técnicas biometalúrgicas de reciclagem são a biolixiviação e a biossorção. A biolixiviação acontece por meio de reações de oxirredução a partir da interação de bactérias, fungos ou algas com metais. A oxirredução é um fenômeno químico em que há a transferência de elétrons de uma espécie química a outra — uma sofre oxidação (perde elétrons) e a outra sofre redução (ganha elétrons, de forma simultânea. Comumente, reações de oxirredução fazem parte do metabolismo dos microrganismos utilizados: são procariotos quimiolitotróficos, bactérias heterotróficas e fungos, principalmente. Microrganismos quimiolitotróficos são aqueles que produzem sua própria energia por meio da oxidação de compostos inorgânicos, e pode-se citar como exemplos os acidófilos *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans* e os *Leptospirillum ferrooxidans*; além disso, esses organismos têm grande resistência à toxicidade de metais pesados. Por outro lado, os organismos heterotróficos são também de ampla utilização no processo de biolixiviação, visto que toleram uma ampla faixa de pH. Para que um processo de biolixiviação se dê da melhor forma possível, é preciso determinar os microrganismos mais compatíveis com o material a ser submetido; em vista disso, alguns fatores sobre ele e o meio em que o processo ocorre devem ser levados em consideração, tais como: tamanho das partículas e área superficial do material, presença de substâncias tóxicas, temperatura, pH, adaptação prévia dos microrganismos, potencial de redução, quantidade de gás oxigênio, gás carbônico e nutrientes disponíveis e a forma em que os metais se encontram.⁴

A biolixiviação como forma de reciclagem do lixo eletrônico ocorre de maneira semelhante ao processo em que a técnica é aplicada para a extração de metais de sulfetos minerais. No processo de biolixiviação realizado pelas bactérias quimiolitotróficas acidófilas, por exemplo, os metais são mobilizados da matriz sólida do resíduo eletrônico pelo Ferro(III) e pelo ácido sulfúrico (H₂SO₄), que atuam como agentes oxidantes. As equações [1] e [2] descrevem esse processo.



De forma paralela, os microrganismos têm sua participação no processo ao oxidarem o enxofre elementar (S⁰), transformando-o no ácido sulfúrico, processo mostrado na equação [3]. Além disso, os microrganismos também são responsáveis por regenerar o Ferro(III) (Eq. [4]). Geralmente, tanto o enxofre elementar como o íon Ferro(II) são externamente adicionados ao meio em que ocorre a biolixiviação.



Um dos maiores desafios existentes no procedimento mais básico de biolixiviação do lixo eletrônico são os efeitos inibidores do lixo no metabolismo dos microrganismos. Os metais pesados, principalmente, desaceleram o desenvolvimento dos micróbios e, desse modo, também reduzem a capacidade de oxidação do ferro. Nesse sentido, uma possível solução seria realizar a cultura do micróbio em um meio separado do lixo, para que os organismos possam se desenvolver sem os efeitos da toxicidade dos metais; é justamente essa separação que configura o tipo de biolixiviação feita em duas etapas. Nesse processo, os micróbios crescem em um meio com nutrientes e outras condições específicas até que a população atinja a fase de crescimento exponencial, isto é, a fase em que os organismos se encontram na plenitude de suas capacidades. A partir daí, o resíduo eletrônico pode ser adicionado ao meio e, assim, submetido ao processo de lixiviação. Cabe ressaltar que esse tipo de procedimento entra na categoria de biolixiviação direta, em que

há a aderência do microrganismo à superfície do resíduo (por forças do tipo van der Waals). Em contrapartida, existe a biolixiviação indireta, em que os microrganismos produzem um lixiviante que oxida o lixo eletrônico e, dessa forma, solubilizam o metal sem precisar estar em contato direto com a sua superfície.

Já com a utilização de bactérias heterotróficas, são priorizadas aquelas que produzem cianeto, como a *Chromobacterium violaceum* e algumas *Pseudomonas* (*P. fluorescens* e *P. putida*, por exemplo), que são encontradas tipicamente na terra e convivem em simbiose com as plantas. O cianeto de hidrogênio, produto metabólico desses microrganismos, solubiliza o ouro encontrado em diversos componentes eletrônicos como processadores por meio de reações de complexólise.

Enfim, o produto da biolixiviação é uma solução multicomponente, da qual a extração seletiva de metais pode ser complicada. Em relação a outra principal técnica biometalúrgica, a biossorção é um mecanismo de adsorção na qual a superfície adsorvente é uma biomassa (biossorvente, que pode ser uma alga, bactéria, fungo ou levedura), sendo um processo físico-químico independente do metabolismo do microrganismo, comumente utilizado como etapa subsequente à biolixiviação, representando a principal opção para a recuperação seletiva

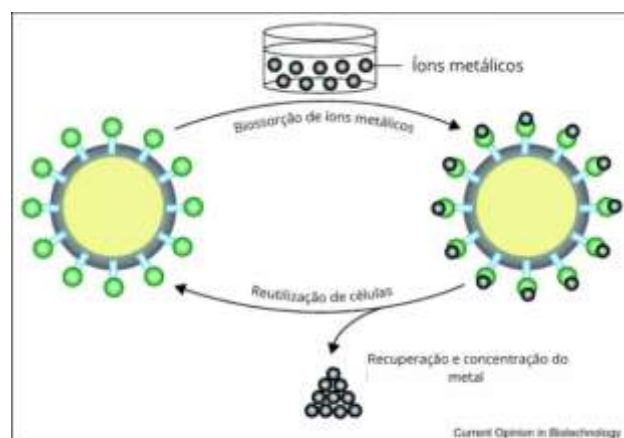


Figura 3 — Esquema do processo de biossorção. Fonte: Adaptado de (KURODA, Kouichi; UEDA, Mitsuyoshi, 2011) [7]

dos metais em fase aquosa. Na biossorção, os íons metálicos em solução aquosa, provenientes de resíduos, ligam-se à superfície do biossorvente (Fig. 3) por meio de polissacarídeos, proteínas associadas ou grupos funcionais como os grupos carboxila, fosfato, sulfato, fenol e hidroxila.

Consoante Usberco e Salvador, autores do livro *Química* (2013, p. 2), “a química está presente em todas as atividades humanas”. Sob essa ótica, pode-se considerar que as escolhas que as pessoas fazem têm, em si, a química envolvida. Para a abordagem experimental deste documento, então, foi conduzida uma pesquisa centrada no questionamento “o que as pessoas fazem com seu lixo eletrônico?”, posto que de nada adianta o desenvolvimento de novas tecnologias de reciclagem se as pessoas não optarem por

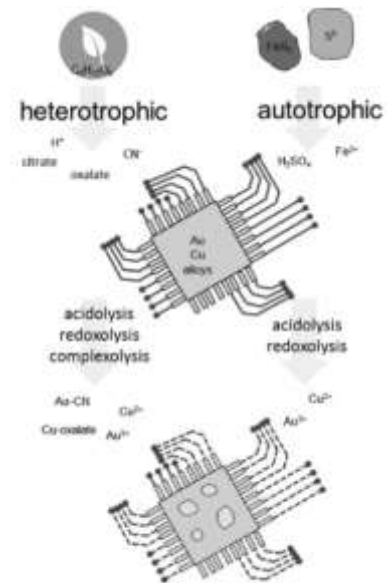


Figura 2 — Esquema do processo de biolixiviação, que pode ocorrer com microrganismos heterotróficos e autotróficos. Fonte: (IŞILDAR, Arda et al, 2018) [5]

contribuir com a coleta, etapa fundamental no processo de reciclagem como um todo. A pesquisa foi feita com a plataforma Google Forms e recebeu respostas de 18 casas de 3 a 8 membros ao longo de uma semana, e os resultados constam na tabela abaixo.

Tabela 1 — Destino de aparelhos eletrônicos que perderam seu uso principal nas 18 casas participantes da pesquisa

Eletrônico	# Aparelhos substituídos nos últimos 3 anos	Destino			
		# Descartados	# Reusados	# Recicladados	# Guardados
Celular	24	5	5	2	12
Televisão	15	8	2	0	5
Computador	15	6	5	0	4

Pela análise da tabela, é possível notar que a maioria dos aparelhos que perderam seu uso principal e foram substituídos foram guardados; seguidamente, muitos foram descartados (colocados junto com lixo comum, como determinado pela a pesquisa). Em comparação com esses dois destinos, o número de aparelhos obsoletos que foram reciclados ou tiveram seu uso recommçado é pequeno. Os resultados mostram uma tendência que as pessoas têm de apenas deixarem seus aparelhos antigos de lado, preocupando-se pouco com outros destinos mais sustentáveis, como a reciclagem. De fato, não é preciso procurar muito para encontrar casas com aparelhos eletrônicos guardados ou mesmo formando pilhas. De resto, é possível citar como causas do número elevado de eletrônicos substituídos nos últimos 3 anos a obsolescência programada, o avanço rápido da tecnologia e a falta de componentes e informação para o conserto de aparelhos, problema relacionado às políticas de empresas fabricantes.

Em suma, em vista dos danos que pode causar ao meio ambiente e aos seres vivos, além do valor que possui agregado, tendo sido, primeiramente, um produto de alta tecnologia, fica evidente a necessidade de ampliar a reciclagem do lixo eletrônico. Nesse processo, os micróbios apresentam-se como ótimos aliados da sociedade, com técnicas biometalúrgicas sendo cada vez mais aplicadas com sucesso na recuperação dos metais que compõem esse lixo. Finalmente, a coleta do lixo não deve ser negligenciada, por tratar-se da etapa que desencadeia todo o resto do processo de reciclagem; percebe-se, então, a prioridade da conscientização (como atividade humana) das pessoas a respeito do tipo de lixo que dispositivos comuns, presentes no cotidiano delas, pode originar — para esse fim, nada mais eficaz que os conhecimentos da Química.

Referências bibliográficas

1. FORTI Vanessa 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).
2. BERNARDES, Andréa Moura; VEIT, Hugo Marcelo. **Electronic Waste: Recycling Techniques**. 1. ed. [S. l.]: Springer International Publishing, 2015. 158 p. ISBN 978-3-319-15714-6. E-book (165 p.).
4. ANAYA-GARZON, Juan; HUBAU, Agathe; JOULIAN, Catherine; GUEZENNEC, Anne-Gwénaëlle. **Bioleaching of E-Waste: Influence of Printed Circuit Boards on the Activity of Acidophilic Iron-Oxidizing Bacteria**. *Frontiers*, [S. l.], v. 12, 18 ago. 2021. DOI 10.3389/fmicb.2021.669738. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.669738/full>. Acesso em: 18mar. 2022.
5. İŞILDAR, Arda et al. **Biotechnological strategies for the recovery of valuable and critical raw materials from waste electrical and electronic equipment (WEEE) – A review**. *Journal of Hazardous Materials*, [S. l.], v. 362, p. 467-481, 17 ago. 2018. DOI 10.1016/j.jhazmat.2018.08.050. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389418307398>. Acesso em: 24 mar. 2022.
6. KURODA, K.; UEDA, M. **Molecular design of the microbial cell surface toward the recovery of metal ions**. *Current Opinion in Biotechnology, Energy biotechnology –Environmental*

biotechnology. v. 22, n. 3, p. 427–433, 1 jun. 2011.