

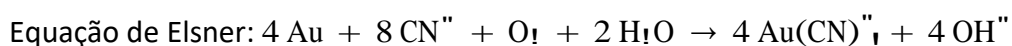
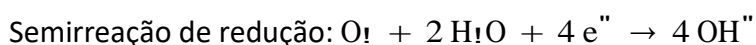
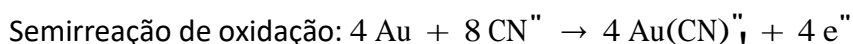
## Bio-reciclagem de lixo eletroeletrônico: uma realidade promissora em ascensão

Atualmente, devido à demanda global por mais recursos e desenvolvimento, em contraste com a preocupação da conservação e renovação dos recursos naturais, a comunidade científica vem estudando diversos métodos para a recuperação de matérias-primas a fim de auxiliar o manejo de recursos naturais de forma sustentável. Um exemplo recente desses esforços científicos veio pelas análises de um problema recente da humanidade: o resíduo de equipamento eletroeletrônico ou REEE.

Os REEEs são equipamentos elétricos que foram descartados devido à falta de atribuição de qualquer valor por quem os possuía, sejam esses aparelhos funcionais ou não. Em 2019, foram geradas cerca de 53,6 milhões de toneladas de REEE, sendo 17,4% dessa quantidade adequadamente reciclada [1]. Outro aspecto relevante a se ressaltar são os impactos que o descarte equivocado causa ao meio ambiente. Esses resíduos são a fonte de 70% da contaminação por metais pesados em aterros americanos [2], além de serem responsáveis por cerca de 98 toneladas métricas de dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) lançadas à atmosfera em 2019. Somada à preocupação ambiental, existe a motivação financeira, oriunda de estimativas que apontam que, da quantidade total de lixo eletrônico produzida, seria possível obter cerca de 57 bilhões de dólares associados a metais recuperados [1].

Para conseguirem atingir um avanço sustentável e adquirir o valor oculto desse resíduo, cientistas estudam e fazem uso de diversas técnicas de extração. Dentre as disponíveis para a recuperação de metais nos REEE, destacam-se metodologias pirometalúrgicas para a extração de metais nobres (Au, Pt, Ir, Os, Pd, Rh, Ru) e técnicas hidrometalúrgicas para a extração de metais de menor valor agregado (Zn, Fe, Cu, Ni, Al, Ti, Nb, Ta). No entanto, a comunidade científica vem explorando um método que talvez venha se tornar a forma mais barata e eficiente para extrair os metais desejados: a biolixiviação. A fim de exemplificar a aplicabilidade e a eficiência desse processo, pesquisadores chineses [3] realizaram estudos para analisar o uso da bactéria *Chromobacterium violaceum* na extração de ouro (Au) a partir de REEE.

A bactéria *C. violaceum*, por produzir cianeto e ser capaz de, no fim de seu ciclo de vida, converter cianeto em β-cianolanina, preservando ciclos biogeoquímicos pré-existentes, possui características metabólicas eficientes para a produção de metabólitos secundários desejados para a degradação do ouro. O metabólito produzido pela bactéria compreende ao ácido cianídrico (HCN), que se dissolve na água e forma ânions CN<sup>-</sup>, os quais reagem com o ouro metálico, formando complexos metálicos altamente solúveis na água, absorvidos pela bactéria, que facilita a extração dos compostos bioacumulados. A equação de Elsner [4] demonstra a formação do ânion Au(CN)<sub>2</sub><sup>-</sup>:



A reação dada acima pode ser potencializada por uma diversidade de fatores previamente analisados pela bibliografia pré-existente [3], demonstrando o impacto da realização do método com materiais previamente macerados, com a inserção de sais nutritivos, com o uso de outros microrganismos, com as condições de temperatura, com a variação de pH e com duas fases de tratamento dos REEE's.

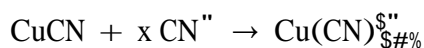
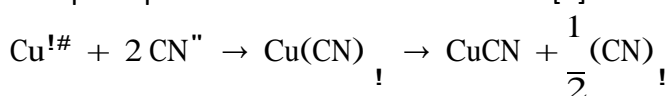
A tabela 1 demonstra os resultados das análises. Os dados mostram que é possível obter um retorno de 73,2% da quantia estimada de ouro ao se fazer uso de outro tipo de bactéria, a *Pseudomonas aeruginosa*, sem necessitar o uso de sais de nutrição e suplementação de oxigênio.

**Tabela 1:** Comparação da maior eficiência biolixiviante de ouro em diferentes condições [3].

Bacteria	Particle size	Pretreatment	Progress	Pulp density	Nutrient salts	Oxygen supplement	The highest efficiency	Reference
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	One step	1.5% w/v	1 g/L MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	-	10.90%	[30]
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	One step	1.5% w/v	1 g/L MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.004%(v/v) H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	11.30%	[30]
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	One step	1.5% w/v	4.0×10 <sup>-4</sup> mol/L MgSO <sub>4</sub>	-	11.80%	[36]
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	One step	1.5% w/v	1.0×10 <sup>-2</sup> mol/L Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	-	9.20%	[36]
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	One step	1.5% w/v	3.0×10 <sup>-2</sup> mol/L Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	10.10%	[36]
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	One step	1.5% w/v	1.0×10 <sup>-2</sup> mol/L Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	-	11.00%	[36]
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	One step	1.5% w/v	3.0×10 <sup>-2</sup> mol/L Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-	11.00%	[36]
<i>Criolaccium</i>	1×1mm	-	Repeated batch culture	-	10 g/L NaCl	-	68.50%	[36]
<i>Criolaccium</i>	1.1µm	-	Repeated batch cultures	1.0mmol/L	1 g/L MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	Aerated with sterilized air	60.00%	[23]
<i>Criolaccium</i>	<75µm	Biooxidized by <i>Az. ferrooxidans</i>	Two step	0.5% w/v	-	-	11.50%	[6]
<i>Criolaccium</i>	37 to 149 µm	-	Two step	1% w/v	-	-	69.30%	[24]
<i>P. aeruginosa</i> , <i>Criolaccium</i>	37 to 149 µm	-	Two step	1% w/v	-	-	73.20%	[24]
<i>P. fluorescens</i> , <i>Criolaccium</i>	37 to 149 µm	-	Two step	1% w/v	-	-	63.10%	[24]
<i>Criolaccium</i>	74 to 400 µm	Biooxidized by <i>Az. ferrooxidans</i>	Two step	0.5% w/v	0.984 g/L MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	homemade sterile oxygenator	70.60%	[42]
<i>Criolaccium</i>	<100µm	nitric acid	Two step	0.5% w/v	-	-	11.30%	[37]
<i>Criolaccium</i>	<100µm	nitric acid	spent medium leaching	0.5% w/v	-	-	30%	[37]

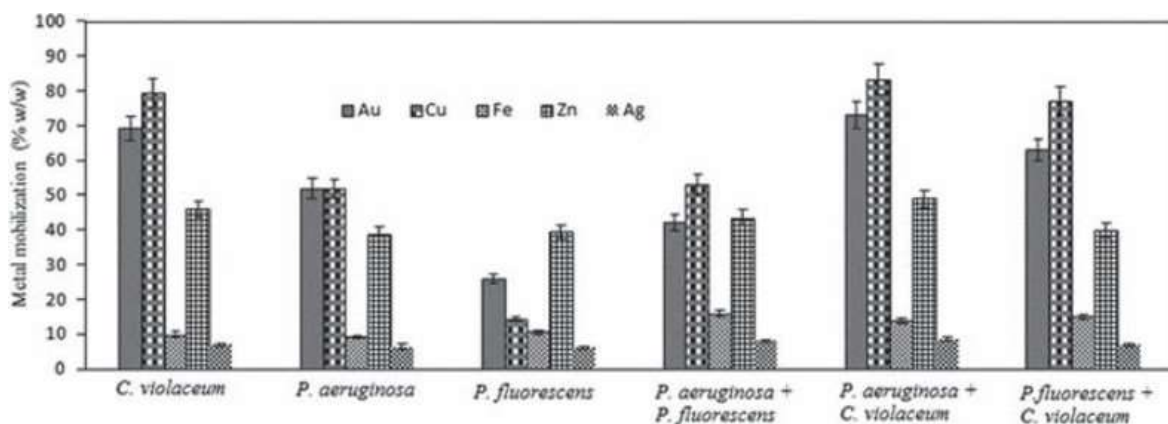
Note that "-" denote "absence" of the items or "the literature did not mention"

As *Pseudomonas aeruginosa* são vitais para melhorar a eficiência da extração do ouro, por serem bactérias que também produzem cianeto, aumentando a quantidade do recurso para se ter uma melhor dissolução desse metal, visto que, durante o processo de degradação do ouro em um complexo metálico solúvel, o restante de outros metais mantém-se na mistura após seu tratamento, mas principalmente os resíduos do cobre [5]. Tal fenômeno pode ser equacionado por [6]:



onde  $x \geq 3$ .

O gráfico da figura 1 ilustra as diferentes porcentagens de obtenção de metais por meio de colônias de bactérias diversas, mostrando o aumento de eficiência oriundo da atuação conjunta de duas espécies de bactérias cianídricas distintas.



**Figura 1:** Percentual de solubilização metálica após a biolixiviação de lixo eletrônico com *C. violaceum*, *P. fluorescens*, *P. aeruginosa* e outras culturas misturadas [7].

Por meio dessas evidências, é possível exemplificar aplicações práticas para plantas de reciclagem de lixo eletroeletrônico, como a startup neozelandesa Mint [8], a qual emprega processos hidrolixivantes utilizando sais de cobre no material macerado, realizando um processo de eletroforese para retirar da massa de resíduos metais de baixa qualidade e o próprio cobre, que será introduzido, posteriormente, a uma colônia de bactérias, tais como as citadas no estudo de Ram Parkash e Jaroslav Zyka [6]. Estas bactérias absorvem esses compostos após a dissolução desses materiais em complexos metálicos solúveis, bastando apenas um processo de fusão e refino para a obtenção de ouro com 99,99% de pureza, eliminando as bactérias.

A figura 2 a seguir representa a finalização da absorção dos complexos metálicos por bioacumulação por parte das bactérias cianídricas, sendo a última etapa biológica do processo.



**Figura 2:** Pasta formada por bactérias após a absorção de  $\text{Au}(\text{CN})_2^-$  [8].

A startup trata o REEE numa planta de escala menor, reciclando cerca de 1 tonelada métrica de lixo por semana, obtendo por volta de 150 gramas de ouro puro pela quantia. Com plantas de operações maiores, podem-se obter resultados mais satisfatórios, como exemplificado na abertura de uma nova planta maior na Austrália, que passará a tratar 10 toneladas métricas por dia, o que equivale a 1% do REEE produzido na Austrália [8].

Em suma, a reciclagem do lixo eletroeletrônico utilizando técnicas bio-hidrometalúrgicas é uma realidade não muito distante, dotada de um potencial de melhora e aplicação para aumentar exponencialmente a capacidade de reaproveitamento e o custo do processo, transformando a cadeia de produção tecnológica em uma estrutura cíclica, capacitando a conservação de recursos metálicos para o desenvolvimento das gerações por vir.

### Referências:

- [1] WIDMER, Rolf *et al.* Global perspectives on e-waste. **Environmental impact assessment review**, v. 25, n. 5, p. 436-458, 2005.
- [2] Site:<<https://collections.unu.edu/view/UNU:7737#viewAttachments>>. Acesso em: 27/02/2022.
- [3] LIU, Renjie; LI, Jingying; GE, Zhongying. Review on Chromobacterium violaceum for gold bioleaching from e-waste. **Procedia Environmental Sciences**, v. 31, p. 947-953, 2016.
- [4] KONDOS, P. D.; DESCHÊNES, G.; MORRISON, R. M. Process optimization studies in gold cyanidation. **Hydrometallurgy**, v. 39, n. 1-3, p. 235-250, 1995.
- [5] SHABANI, M. A. et al. Bioleaching of copper oxide ore by Pseudomonas aeruginosa. **International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials**, v. 20, n. 12, p. 1130-1133, 2013.
- [6] PARKASH, Ram; ZÝKA, Jaroslav. The reaction between copper (II) and cyanide ions. **Microchemical Journal**, v. 17, n. 3, p. 309-317, 1972.
- [7] PRADHAN, Jatindra Kumar; KUMAR, Sudhir. Metals bioleaching from electronic waste by Chromobacterium violaceum and Pseudomonads sp. **Waste management & research**, v. 30, n. 11, p. 1151-1159, 2012.
- [8] Site:<<https://www.youtube.com/watch?v=4yGPm1U7U6s>>. Acesso em: 29/02/2022.