

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

**BIOEXTRAÇÃO DE METAIS PROVENIENTES DO LIXO ELETRÔNICO
EMPREGANDO BIOLIXIVIAÇÃO**

LEISSA MOABE OLIVEIRA ROSA FLORINTINO

UBERLANDIA

2024

LEISSA MOABE OLIVEIRA ROSA FLORINTINO

BIOEXTRAÇÃO DE METAIS PROVENIENTES DO LIXO ELETRÔNICO
EMPREGANDO BIOLIXIVIAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia Química
da Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Química

Área de Concentração: Engenharia Bioquímica

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Juliana de Souza Ferreira

UBERLÂNDIA

2024

BIOEXTRAÇÃO DE METAIS PROVENIENTES DO LIXO ELETRÔNICO EMPREGANDO BIOLIXIVIAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado
para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Química da Universidade Federal de
Uberlândia (MG) pela banca examinadora formada
por:

Uberlândia, 2024.

Prof^ª. Dr^ª. Juliana de Souza Ferreira, FEQUI/UFU

Prof^ª. Dr^ª. Vicelma Luiz Cardoso, FEQUI/UFU

M. Sc. Warlen Agnelo Dias, Doutorando PPGEQ/FEQUI/UFU

Dedico este trabalho às mulheres cientistas que me inspiraram ao longo dos anos, por sua inteligência, perseverança, paixão pela ciência e compromisso com a mudança.

AGRADECIMENTOS

Minha jornada acadêmica foi repleta de desafios e conquistas, e nada disso seria possível sem o apoio de pessoas especiais que me incentivaram e me guiaram ao longo do caminho.

Primeiramente quero agradecer a minha família, por todo apoio aos longos anos. Meu esposo, Luiz Paulo Souza de Oliveira, foi meu porto seguro durante toda a graduação. Sua crença inabalável em meu potencial me impulsionou nos momentos mais difíceis. As inúmeras caronas, revisões de trabalhos e exercícios, e seu constante amor e incentivo me deram a força necessária para alcançar meus objetivos. Meus avós, João Cardoso e Valdeli, me ensinaram valores valiosos e me proporcionaram a oportunidade de estudar nesta universidade. Sou eternamente grata por seu amor, apoio incondicional e pelos sacrifícios que fizeram para que eu pudesse realizar meus sonhos. Também quero agradecer a minha mãe, que me ajudou na minha escolha de curso e sempre foi uma fonte de inspiração nos meus estudos.

Sou grata também aos amigos que fiz no decorrer da minha graduação, por toda ajuda, companheirismo e por deixar o ambiente acadêmico mais leve e prazeroso. A amizade, ajuda e companheirismo de vocês foram essenciais para superar os desafios da graduação.

Aos docentes que compartilharam seu conhecimento, dedicaram seu tempo e fizeram o seu melhor trabalho para que eu pudesse chegar até aqui. Inúmeros professores contribuíram tanto para a minha formação acadêmica quanto para o meu desenvolvimento pessoal, sou muito grata pela experiência que obtive graças a eles, em especial a minha professora orientadora, Juliana de Souza Ferreira que me inspirou em suas aulas de engenharia bioquímica e despertou a minha curiosidade para essa área.

Agradeço a Deus por me conceder conhecimento, por colocar pessoas singulares em meu caminho e por todos os desafios que me levaram a concluir esta etapa, proporcionando-me melhorias tanto profissionais quanto pessoais.

“Na vida, não existe nada a temer, mas a entender.”

(Marie Curie)

RESUMO

A presente revisão bibliográfica investiga, sob a perspectiva da sustentabilidade, a recuperação de metais presentes no lixo eletrônico (e-lixo) por meio da biolixiviação, com ênfase especial na recuperação de lítio. O estudo aborda de forma abrangente a caracterização dos resíduos eletrônicos e dos metais contidos neles, além dos mecanismos de biolixiviação, a seleção de microrganismos eficientes e os fatores que influenciam a eficiência desse processo. Com o aumento expressivo na geração de e-lixo devido ao rápido avanço tecnológico e ao consumo crescente de dispositivos eletrônicos, surgem desafios ambientais significativos. A biolixiviação se destaca como uma alternativa promissora frente aos métodos convencionais, como a hidrometalurgia e a pirometalurgia, que exigem altos custos energéticos e geram resíduos tóxicos. Esse processo biotecnológico utiliza microrganismos, como bactérias e fungos, para solubilizar e extrair metais de resíduos eletrônicos, especialmente de componentes como baterias de celulares e dispositivos de armazenamento de energia. Essa técnica apresenta o potencial de minimizar os impactos ambientais e econômicos, proporcionando uma solução mais sustentável e eficiente para a recuperação de metais. No processo de biolixiviação, a escolha de microrganismos específicos é essencial para alcançar bons resultados. Bactérias como *Acidithiobacillus ferrooxidans* e fungos como *Aspergillus niger* têm mostrado eficácia em solubilizar metais, permitindo sua recuperação de forma seletiva. A seleção de microrganismos eficientes é crucial para otimizar o processo, e fatores como pH, temperatura, tipo de lixiviante e o uso de agentes quelantes são determinantes para a eficácia da extração de metais. A otimização desses parâmetros requer pesquisas adicionais para alcançar melhores rendimentos, pesquisas envolvendo a adaptação de microrganismos a meios tóxicos veem mostrado avanço nesse processo. Diversos mecanismos de biolixiviação são discutidos, demonstrando a caracterização dos tipos de dispositivos eletrônicos e na identificação dos metais presentes em cada um. Esse entendimento permite a escolha do microrganismo, ou cultura, mais adequada para cada caso. A implementação dessa técnica pode reduzir significativamente o impacto ambiental causado pelo descarte de e-lixo, promovendo a recuperação de recursos valiosos e contribuindo para uma bioeconomia circular. Os metais recuperados, além de serem reutilizados em baterias ou outros equipamentos eletrônicos, têm potencial para diversas aplicações industriais, aumentando o valor agregado presente nos resíduos eletrônicos. A biolixiviação oferece uma abordagem promissora para o tratamento de resíduos eletrônicos, representando uma solução sustentável para a problemática do e-lixo. Com o avanço das pesquisas e a contínua otimização dos processos, essa técnica pode desempenhar um papel central na recuperação de recursos e na mitigação dos desafios ambientais e econômicos associados ao descarte de dispositivos eletrônicos. Em suma, investir na biolixiviação não apenas promove a sustentabilidade na indústria eletrônica, mas também incentiva o desenvolvimento de uma cadeia de produção mais responsável e comprometida com a preservação ambiental.

Palavras-chave: biolixiviação, recuperação de metais, lixo eletrônico.

ABSTRACT

This literature review investigates, from a sustainability perspective, the recovery of metals present in electronic waste (e-waste) through bioleaching, with special emphasis on lithium recovery. The study comprehensively addresses the characterization of electronic waste and the metals contained therein, in addition to the mechanisms of bioleaching, the selection of efficient microorganisms and the factors that influence the efficiency of this process. With the significant increase in the generation of e-waste due to rapid technological advances and the growing consumption of electronic devices, significant environmental challenges arise. Bioleaching stands out as a promising alternative to conventional methods, such as hydrometallurgy and pyrometallurgy, which require high energy costs and generate toxic waste. This biotechnological process uses microorganisms, such as bacteria and fungi, to solubilize and extract metals from electronic waste, especially from components such as cell phone batteries and energy storage devices. This technique has the potential to minimize environmental and economic impacts, providing a more sustainable and efficient solution for metal recovery. In the bioleaching process, the selection of specific microorganisms is essential to achieve good results. Bacteria such as *Acidithiobacillus ferrooxidans* and fungi such as *Aspergillus niger* have shown efficacy in solubilizing metals, allowing their selective recovery. The selection of efficient microorganisms is crucial to optimize the process, and factors such as pH, temperature, composition of leaching medium and the use of chelating agents are determining factors for the effectiveness of metal extraction. Optimizing these parameters requires additional research to achieve better yields; research involving the adaptation of microorganisms to toxic environments has shown progress in this process. Several bioleaching mechanisms are discussed, demonstrating the characterization of the types of electronic devices and the identification of the metals present in each one. This understanding allows the selection of the most appropriate microorganism, or culture, for each case. The implementation of this technique can significantly reduce the environmental impact caused by the disposal of e-waste, promoting the recovery of valuable resources and contributing to a circular bioeconomy. In addition to being reused in batteries or other electronic equipment, recovered metals have the potential for a variety of industrial applications, increasing the added value present in electronic waste. Bioleaching offers a promising approach to the treatment of electronic waste, representing a sustainable solution to the problem of e-waste. With advances in research and continuous optimization of processes, this technique can play a central role in resource recovery and mitigating the environmental and economic challenges associated with the disposal of electronic devices. In short, investing in bioleaching not only promotes sustainability in the electronics industry, but also encourages the development of a more responsible production chain committed to environmental preservation.

Keywords: bioleaching, metal recovery, electronic waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Princípio da logística reversa.	16
Figura 2 - Configuração de uma placa eletrônica	17
Figura 3 - Cadmio em pó	22
Figura 4 - Diagrama do processo Recupyl para recuperação dos metais provenientes de baterias de lítio	24
Figura 5 - Modelo de arranjo setorial para uma bioeconomia circular centrada na mineração urbana de matérias-primas críticas.	29

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação e composição de pilhas e baterias	20
Quadro 2 - Comparação entre os principais métodos de recuperação de metais provenientes do e-lixo.	25
Quadro 3 - Comparação de diferentes tecnologias no tratamento de WPBC	26
Quadro 4 - Eficiência da biolixiviação de diferentes fontes metálicas.	28
Quadro 5 - Utilização de bactérias produtoras de quelantes na biolixiviação do e-lixo	33

SUMÁRIO

1	12
1.1	14
1.1.1	14
2	16
2.1	16
2.1.1	18
2.1.2	21
2.2	22
2.3	24
2.4	26
3	29
3.1	32
3.1.1	33
3.1.2	34
3.1.3	35
3.1.4	35
4	40
5	41
6	42
7	44

1 INTRODUÇÃO

A problemática do lixo eletrônico (e-lixo) e a busca por alternativas ecológicas para a recuperação de metais valiosos se configuram como um desafio urgente e de grande relevância para a sociedade contemporânea. De acordo com a ONU (Organização das Nações Unidas) a produção global de lixo eletrônico atingiu 62 milhões de toneladas em 2022, com apenas 22,3% desta quantidade sendo recolhida e reciclada (ONU News, 2024). Em um mundo cada vez mais tecnológico e automatizado, a demanda por produtos eletrônicos cresce exponencialmente. O avanço acelerado da tecnologia gera obsolescência programada, levando ao descarte prematuro de equipamentos ainda funcionais. A crescente demanda por metais contrasta com o esgotamento das reservas de alto teor, impondo à indústria da mineração o desafio de extrair metais de minérios de baixos teores e de rejeitos de forma viável e sustentável. Renunciar a tecnologias tradicionais e investir em inovações é crucial para garantir o futuro da mineração e o acesso a esses recursos essenciais para o desenvolvimento da sociedade desse cenário preocupante, a criação de uma logística reversa eficiente para a reciclagem dos componentes do e-lixo se torna urgente (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA, 2010) . Essa medida é crucial para a sustentabilidade ambiental e econômica, pois os metais presentes nesses equipamentos, além de serem agentes poluentes, possuem alto valor agregado no mercado.

A crescente demanda por tecnologias mais sustentáveis, como veículos elétricos e sistemas de geração de energia solar, que fazem usos de inúmeras baterias de íons lítio, trouxe uma nova perspectiva para a economia de recursos naturais e para o gerenciamento de resíduos. No entanto, essas tecnologias, que são essenciais na transição para uma matriz energética mais limpa, dependem de materiais que, ao mesmo tempo, são recursos finitos e esgotáveis. Essas baterias são compostas por metais de grande valor e alta criticidade, ou seja, cuja escassez resulta em impactos significativos, como lítio, cobalto, níquel e manganês, que possuem reservas limitadas no planeta e cuja extração é ambientalmente hostil.

Além disso, o crescimento do uso de painéis solares fotovoltaicos está diretamente associado ao aumento da demanda por baterias de íons de lítio, especialmente em sistemas de armazenamento de energia. A geração de energia por meio de painéis solares é intermitente, ou seja, depende das condições climáticas e da incidência solar, o que significa que a produção de energia nem sempre coincide com os momentos de maior demanda. Para maximizar a eficiência e garantir o fornecimento de energia durante a noite ou em dias nublados, as baterias de íons de lítio têm se tornado uma solução essencial para armazenar a energia excedente gerada durante

os períodos de maior produção. Estudos indicam que a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica aumentou 345 GW em 2023, tendo esta fonte acumulando um potencial de 1.419 GW, o que reflete um avanço significativo, mas que também ressalta a necessidade urgente de garantir uma cadeia produtiva sustentável para a geração de energia renovável (CASARIN, 2024). Vale ressaltar que na reportagem de Casarin (2024), há o registro de que o Brasil ocupa a 6ª posição no ranking de global de energia solar.

Tem-se a estimativa de que poderá levar a uma escassez global do metal já em 2025 e que, até 2030, a procura global atingirá marca superior a 3 milhões de toneladas devido ao aumento da produção de baterias para veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia (ÉPOCA, 2023). Diante disso, a conscientização de uma economia circular, que leva em consideração os benefícios da reciclagem desses materiais, aliada à criação de incentivos para a adoção de práticas sustentáveis de descarte, é essencial.

Além de uma política eficiente para o descarte adequado de lixo eletrônico, é crucial implementar um processo eficaz de recuperação dos metais contidos em baterias e celulares. Essa prática não apenas impacta diretamente na eficiência da recuperação, mas também na quantidade de resíduos gerados e, consequentemente, no custo final dos metais envolvidos.

Os processos de reciclagem de pilhas e baterias envolvem essencialmente duas etapas principais: a preparação da sucata e o processamento metalúrgico. No entanto, a recuperação dos metais apresenta desafios significativos, uma vez que a maioria dos processos de reciclagem foi desenvolvida para tratar apenas um ou poucos tipos de pilhas ou baterias. Por exemplo, um processo que se destina à reciclagem de pilhas zinco-carbono e alcalinas, geralmente, não permite a contaminação com baterias de níquel-cádmio (Ni-Cd) e a classificação de pilhas e baterias, a fim de selecionar a técnica mais eficiente para a recuperação dos metais presentes, muitas vezes não é viável economicamente para a indústria (SCHWEABE et al., 2011).

A reciclagem desses metais demanda a aplicação de diferentes técnicas metalúrgicas, entre as quais se destacam a biolixiviação, a pirometalurgia e a hidrometalurgia, que são amplamente discutidas na literatura por sua eficácia e variabilidade de aplicação (Vuković et al., 2019).

Quando é analisada a técnica de pirometalurgia, que envolve processos térmicos baseado em altas temperaturas para a recuperação de metais, vê-se que, apesar de ser altamente

eficiente, apresenta desvantagens, como o elevado consumo energético e a emissão de gases poluentes. Já a hidrometalurgia, que emprega solventes químicos para extrair os metais, há uma melhora quanto à eficiência na recuperação, principalmente de metais preciosos, mas, por outro lado, existe desafios relacionados ao manejo de resíduos líquidos tóxicos. A biolixiviação surge como uma alternativa promissora para a recuperação de metais de baterias e celulares usados, oferecendo uma solução mais sustentável em comparação com os métodos tradicionais (MISHRA et al., 2008).

A biolixiviação é um processo biotecnológico que utiliza microrganismos para solubilizar e extrair metais de seus minérios ou resíduos. Essa técnica se fundamenta na capacidade dos microrganismos de oxidar, reduzir ou complexar os metais, tornando-os solúveis em água. Os principais tipos de microrganismos empregados na biolixiviação são bactérias e fungos. Esta técnica vantajosa resulta em um menor impacto ambiental e uma excelente viabilidade econômica. No entanto, há diversos desafios a serem superados, desde a escala do projeto até a complexidade da matriz dos dispositivos a serem processados, o que pode afetar o desempenho dos microrganismos (JI et al., 2022). E, é sobre estes desafios e possíveis alternativas de superá-los que este trabalho propõe abordar, dando destaque para o uso de quelantes para o aumento da eficiência do processo de biolixiviação,

1.1 OBJETIVOS

Realizar uma revisão bibliográfica e abordar os principais aspectos da biolixiviação como método de recuperação sustentável de metais provenientes do lixo eletrônico, considerando diferentes variáveis de processo, como dispositivos, soluções lixiviantes e espécies de microrganismos.

1.1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Destacar a importância de se recuperar os metais presentes em diferentes tipos de e-lixo.
- Abordar as técnicas empregadas para a recuperação desses metais;
- Investigar a biolixiviação, através das variáveis que influenciam este processo, indicando os possíveis ganhos em termos econômicos, técnicos e ambientais que esta técnica pode promover na recuperação de metais de e-lixo;
- Indicar os microrganismos que se destacam como eficientes para a biolixiviação de metais de e-lixo;

- Relacionar os parâmetros que podem maximizar a recuperação de metais pela biolixiviação.
- Analisar o papel dos quelantes biodegradáveis como alternativa sustentável na extração de metais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para compreender plenamente o processo de biolixiviação de metais presentes em resíduos eletrônicos, é crucial abordar quatro aspectos principais. Em primeiro lugar, é essencial analisar a composição do lixo eletrônico, identificando os diferentes tipos de dispositivos e os metais específicos presentes em cada um e quais os outros principais métodos que são aplicados ou estudados atualmente. Em seguida, é importante explorar os mecanismos envolvidos na biolixiviação de metais, dando ênfase na recuperação de lítio, dado seu papel significativo e crescente uso em baterias e dispositivos eletrônicos vinculado ao risco de escassez no futuro.

Além disso, é fundamental examinar os microrganismos empregados nesse processo biotecnológico, compreendendo como são selecionados de acordo com os resultados desejados. Por fim, devemos considerar os diversos fatores que influenciam a eficácia da biolixiviação, incluindo as condições operacionais que otimizam a recuperação dos metais valiosos presentes nos resíduos de baterias e celulares descartados. Essa abordagem holística permite uma compreensão abrangente e a implementação eficaz dessa técnica de recuperação de metais.

2.1 LIXO ELETRÔNICO: COMPOSIÇÃO E IMPACTOS AMBIENTAIS

O lixo eletrônico (e-lixo) ou lixo tecnológico, também conhecido como RAEE (Resíduos de Aparelhos Eletroeletrônicos), representa um desafio crescente no mundo moderno (BARTHOLOMEU et al., 2011). Estimativas indicam que o Brasil consome anualmente cerca de 3 bilhões de unidades de pilhas e baterias, das quais 800 milhões correspondem a pilhas comuns, cerca de 10 milhões de baterias de celular, 12 milhões de baterias automotivas e 200 mil baterias industriais e apenas 5% são descartadas de forma correta (KEMERICH et al., 2013).

Os telefones celulares compõem uma parte significativa do lixo eletrônico global devido à sua acessibilidade e curto ciclo de vida, que gira em torno de um ano. Estima-se que cerca de 100 milhões de aparelhos sejam descartados anualmente, seja por falhas funcionais ou obsolescência em relação a novos modelos. Esses aparelhos, possuem diversos componentes de valor em sua estrutura destacando-se a bateria, que é composta por metais como lítio, cobalto e níquel. Além das baterias, também pode-se citar as placas de circuito impresso (PCIs), que

são altamente relevantes no processo de recuperação, por contém diversos metais em sua estrutura, representando aproximadamente 30% do peso total de um aparelho (COSTA, 2022).

O aumento do consumo e o descarte inadequado de pilhas e baterias representam sérios riscos à saúde pública e ao meio ambiente. Para uma gestão eficaz desses resíduos, é necessário investir em medidas abrangentes, como educação ambiental, ampliação da infraestrutura de coleta seletiva, incentivo à produção e consumo de produtos ecologicamente corretos, e fortalecimento da fiscalização e aplicação de leis voltadas às questões ambientais.

Segundo CARVALHO et al. (2016), a logística reversa do lixo eletrônico no Brasil, embora amparada por legislação, configura-se como um desafio que exige a cooperação entre consumidores, empresas e poder público. O sucesso dessa atividade depende de ações conjuntas para garantir o descarte correto e a proteção ambiental. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305/2010, estabelece a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, incluindo a logística reversa. O Decreto nº 10.240/2020 regulamenta a logística reversa de eletroeletrônicos, definindo metas de coleta e destinação final para os fabricantes. Na Figura 1 tem-se um diagrama que ilustra como funciona o programa de logística reversa do lixo eletrônico.

Figura 1 - Princípio da logística reversa.



Fonte: Mais Polímeros, 2024.

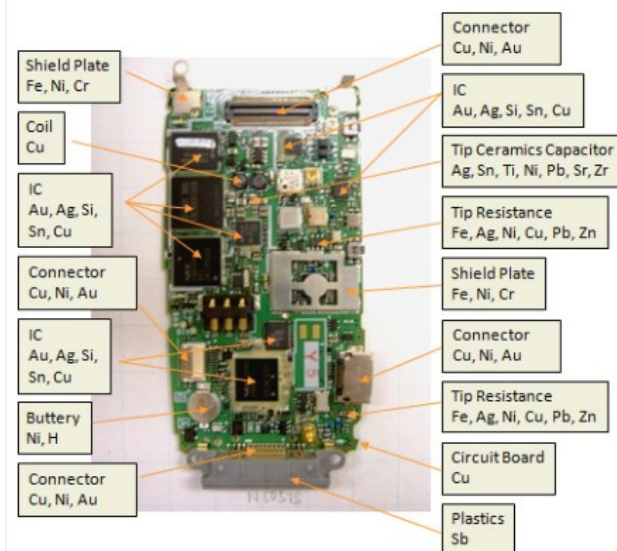
Os desafios para a efetividade da logística reversa envolvem a falta de conhecimento e engajamento dos consumidores, que muitas vezes não sabem como ou onde descartar produtos eletrônicos corretamente. Ademais, a infraestrutura de coleta ainda é insuficiente, especialmente em áreas remotas, e os custos elevados da logística reversa podem ser repassados aos consumidores, aumentando o preço final dos produtos (MOI et al., 2012). De acordo com

KEMERICH et al. (2013), cada bateria ou pilha descartada de forma inadequada no meio ambiente pode contaminar uma área de aproximadamente um metro quadrado, e essa contaminação pode ser ainda maior se o descarte for feito por meio de lixões clandestinos.

O e-lixo é composto por uma variedade de materiais, incluindo metais pesados (chumbo, mercúrio, cádmio), plásticos, baterias e outros componentes que podem ser altamente tóxicos se descartados de forma inadequada (KEMERICH et al., 2013). O descarte incorreto em aterros sanitários ou incineração libera essas substâncias no meio ambiente, contaminando o solo, a água e o ar, e colocando em risco a saúde humana e a fauna (MOI et al., 2012).

A composição do lixo eletrônico é heterogênea e inclui uma variedade de substâncias perigosas e/ou não perigosas (ADETUNJI, 2023). De acordo com o Green Eletron (2024), há mais de 60 elementos usados na produção de dispositivos eletrônicos. Na placa presente na Figura 2 é possível perceber a quantidade de metais presentes na sua composição. A fim de compreender os riscos e impactos ambientais associados ao descarte inadequado desses materiais, torna-se crucial uma análise minuciosa de seus elementos constituintes e respectivas propriedades (PROVAZI et al., 2012).

Figura 2 - Configuração de uma placa eletrônica



Fonte: Green Eletron, (2024).

2.1.1 Pilhas e baterias presentes no e-lixo

Dentre os lixos eletrônicos, pode-se dar destaque às pilhas e baterias que, como foi citado anteriormente, tem a sua produção crescente em virtude da demanda para uso em celulares, carros elétricos e sistema de armazenamento de energia em rede fotovoltaica.

Atualmente, as pilhas e baterias mais utilizadas variam em suas aplicações, características químicas e eficiência energética. As pilhas alcalinas, disponíveis em tamanhos como AA, AAA, C e D, são amplamente utilizadas em dispositivos de baixo consumo, como controles remotos, brinquedos e lanternas. Embora sejam econômicas e apresentem uma durabilidade aceitável para pequenos dispositivos eletrônicos, as pilhas alcalinas enfrentam limitações significativas quando utilizadas em equipamentos que demandam alta energia, como câmeras digitais ou ferramentas elétricas (REDDY, 2011).

As baterias são dispositivos eletroquímicos compostos por múltiplas células, pilhas, interconectadas em série ou em paralelo para aumentar a tensão ou a capacidade, respectivamente. Dependendo da sua capacidade de ser recarregada, as baterias podem ser classificadas em primárias, que não são recarregáveis, ou secundárias, que podem ser recarregadas e utilizadas novamente (MENDONÇA, 2017).

Já as baterias de íon-lítio (Li-ion) têm se tornado o padrão para dispositivos eletrônicos portáteis, incluindo smartphones e laptops, bem como em ferramentas elétricas e veículos elétricos. São baterias usadas por grandes marcas, como a Apple e a Tesla. Sua popularidade se deve à alta densidade de energia, capacidade de recarga e longa vida útil, tornando-as uma escolha ideal para aplicações que exigem desempenho consistente e confiável (KAINAT et al., 2024).

As baterias de níquel-metal-hidreto (NiMH) superaram as limitações das baterias de níquel-cádmio (NiCd) ao apresentar menor suscetibilidade ao efeito memória, no qual consiste em um fenômeno que reduz a capacidade das NiCd ao longo do tempo, ou seja, as baterias NiMH tem maior número de ciclos de carga e descarga comparada com as de NiCd (YOUNG, 2016). Essa característica, associada à maior densidade energética das NiMH, tornou-as a escolha padrão para uma ampla gama de dispositivos eletrônicos portáteis, incluindo câmeras digitais e brinquedos. Essa característica, aliada à sua maior capacidade energética e menor impacto ambiental, consolidou as NiMH como uma opção preferencial para diversas aplicações eletrônicas

A evolução tecnológica das baterias impulsiona a busca por soluções mais leves, seguras e eficientes. Enquanto as baterias de chumbo-ácido, tradicionalmente utilizadas em veículos, apresentam limitações relacionadas ao peso e à toxicidade, as baterias de lítio-ferro-fosfato (LiFePO_4) surgem como uma alternativa mais moderna. As LiFePO_4 , com sua alta densidade

de energia e longa vida útil, estão sendo cada vez mais adotadas em veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário, impulsionando a transição para um futuro mais sustentável (ZHAO et al., 2024).

Conforme PROVAZI et al. (2012), os metais mais comumente presentes nas pilhas e baterias são o zinco, lítio, níquel, ferro, cobre e manganês. Há também a presença de metais visto como perigosos, como o chumbo, mercúrio, cádmio, cobalto e terras-raras. Nas pilhas alcalinas é a composição predominante é zinco e dióxido de manganês, levando a um menor risco de contaminação em comparação com as outras pilhas. Já nas pilhas de botão contêm mercúrio, óxido de prata ou lítio e são altamente perigosas quando descartadas de forma inadequada. Tal como as pilhas de botão, as baterias recarregáveis também são vistas como resíduos perigosos, pois são compostas por níquel, chumbo, lítio ou íons de lítio. A classificação das pilhas e baterias baseada nas reações químicas e nos metais recuperáveis, é apresentada em detalhes na Quadro 1.

Tanto as pilhas primárias, de uso único e descarte obrigatório, quanto baterias secundárias, apesar de recarregáveis, apresentam um potencial significativo para a recuperação de metais. A reciclagem dessas fontes de energia é crucial para minimizar os impactos ambientais causados pelo descarte inadequado e para garantir a sustentabilidade da produção de dispositivos eletrônicos, visto que os metais nelas contidos são valiosos e limitados

Quadro 1 - Classificação e composição de pilhas e baterias

Tipo	Classificação	Reação	Potência elétrica (V)	Metais de interesse para a extração
Pilhas Alcalinas	Primária	$Zn + 2MnO_2 + H_2O \rightarrow ZnO + Mn_2O_3$	1,5	Zinco (Zn), Manganês (Mn)
Pilhas de Zinco Carvão	Primária	$Zn + 2MnO_2 + 2NH_4^+ \rightarrow Zn^{2+} + Mn_2O_3 + 2NH_3 + H_2O$	1,5	Zinco (Zn), Manganês (Mn)
Pilhas de Lítio	Primária	$Li + MnO_2 \rightarrow LiMnO_2$	3,0	Lítio (Li), Manganês (Mn)
Baterias de Íon-Lítio	Secundária	$LiC_6 + CoO_2 \leftrightarrow C_6 + LiCoO_2$	3,7	Lítio (Li), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Manganês (Mn)
Baterias de níquel-Cádmio	Secundária	$Cd + 2NiO(OH) + 2H_2O \leftrightarrow Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$	1,2	Níquel (Ni), Cádmio (Cd)
Baterias de Níquel-Metal-Hidreto	Secundária	$MH + NiO(OH) \leftrightarrow M + Ni(OH)_2$	1,2	Níquel (Ni), Terras Raras
Baterias de Chumbo-Ácido	Secundária	$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \leftrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$	2,0	Chumbo (Pb)
Baterias de Lítio-Ferro-Fosfato	Secundária	$LiFePO_4 + C_6 \leftrightarrow FePO_4 + LiC_6$	3,2	Lítio (Li), Ferro (Fe), Fósforo (P)

Fonte: Elaborado pela autora

2.1.2 Impactos ambientais e à saúde oriundos do e-lixo

Os metais perigosos apresentam alta toxicidade, podendo ocasionar diversos problemas de saúde, tais como danos neurológicos, renais e pulmonares. São metais bioacumulativos, ou sejam, esses metais tendem a se acumular nos organismos vivos ao longo da cadeia alimentar (FARIAS, 2023). Os dados causados à saúde humana podem vir a ser desde uma simples dermatite até alteração do DNA, causando defeitos congênitos, insuficiência cardíaca e câncer (ADETUNJI, 2023).

Além dos impactos ambientais e à saúde causados pela presença desses metais, o lixo eletrônico (e-lixo) contém uma variedade de materiais de alto valor econômico e industrial, como metais preciosos (ouro, prata e platina) e uma gama de outros componentes, incluindo polímeros, fibra de vidro, retardadores de chama e metais ferrosos e não ferrosos (ADETUNJI,

2023). A presença desses materiais torna o e-lixo um recurso potencial para reciclagem e recuperação de valor.

Contudo, para viabilizar a extração de metais e substâncias de interesse de maneira eficiente, é necessário realizar pré-tratamentos específicos, como a separação física, a trituração e a classificação dos diferentes componentes. Esses processos iniciais de preparação são essenciais para melhorar a eficácia dos métodos subsequentes de recuperação, que podem envolver técnicas hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas ou biotecnológicas. A implementação de estratégias de pré-tratamento e recuperação adequadas não só maximiza a recuperação de materiais de alto valor agregado, como também minimiza o impacto ambiental, promovendo uma abordagem sustentável para o gerenciamento do lixo eletrônico.

Nos últimos anos, a União Europeia tem avançado em direção à implementação de uma economia circular, com foco na valorização de resíduos como recursos reutilizáveis (MUNIZ, 2023). No entanto, a reciclagem desses materiais enfrenta obstáculos importantes, como a baixa eficiência das tecnologias atuais e a complexidade dos dispositivos. Assim, a melhoria dos processos de reciclagem e a adaptação dos modelos de negócios são essenciais para aumentar a recuperação desses recursos valiosos e promover uma economia mais sustentável no mundo.

Nas seções seguintes (2.2. a 2.4) são descritas as características dos principais métodos aplicados no processo de reciclagem dos metais de pilhas e baterias (pirometalurgia, hidrometalurgia/lixiviação e bio-hidrometalurgia/biolixiviação), assim como citados outros possíveis métodos que têm sido sugeridos.

2.2 PIROMETALURGIA

Desde os primórdios da metalurgia, o fogo tem sido o aliado fundamental na extração de metais, dando origem à pirometalurgia. Essa é a área da metalurgia que envolve o uso de altas temperaturas para realizar a extração, purificação ou modificação de metais a partir de minérios ou resíduos. Os processos pirometalúrgicos, como fusão, calcinação, refino e torrefação, utilizam calor intenso para separar os metais desejados de materiais não metálicos ou impurezas. A principal vantagem dessa técnica capacidade de reciclar diversos tipos de baterias sem a exigência de pré-tratamentos (OHTSUKA, 2022). Essa técnica é amplamente empregada na extração de metais como ferro, cobre, chumbo e zinco. Entretanto um dos principais desafios da pirometalurgia é o elevado consumo de energia, além da geração de

gases, como o dióxido de enxofre, que são obtidos em alguns processos, o que torna necessária a adoção de tecnologias mais sustentáveis.

Devido ao elevado custo energético associado à pirometalurgia, este método pode ser utilizado em conjunto com outras técnicas de recuperação, visando uma maior eficiência na recuperação de metais presentes em resíduos eletrônicos. Frequentemente, a pirometalurgia é empregada como etapa de pré-tratamento, antecedendo processos de lixiviação. No entanto, diversos estudos indicam que a pirometalurgia isolada também pode alcançar elevados rendimentos e eficiência na recuperação de metais, dependendo das condições operacionais aplicadas. De acordo com (GOMES; MILKE, 2022) é possível se obter cádmio com pureza de 99,95% de pureza usando o processo francês SNAM-SAVAM, que é totalmente pirometalúrgico. Esse processo é empregado na recuperação de pilhas e baterias do tipo Ni-Cd e de íons lítio, onde após o desmanche e compressão das células de bateria, elas são tratadas termicamente há 900° C. Após a recuperação o cádmio é vendido a fabricantes de pilhas Ni-Cd. É possível visualizar o pó de cádmio de pureza alta na Imagem 3 a seguir.

Figura 3 - Cádmio em pó



Fonte: Institut Selene (2024)

A pirometalurgia pode ser utilizada também para tratar pilhas de zinco-carbono devido às diferenças nos pontos de ebulição dos principais metais presentes, como mercúrio, zinco e manganês. Durante o aquecimento, ocorrem eventos térmicos importantes, como a evaporação da água, seguida pela eliminação do mercúrio, e, após essa etapa, o zinco pode ser recuperado por destilação em temperaturas superiores a 907°C, seu ponto de ebulição (SCHWEABE et al., 2011).

Atualmente, o método mais consolidado para a recuperação de baterias de íons de lítio envolve a combinação de pirometalurgia e hidrometalurgia. Inicialmente, a pirometalurgia é aplicada para promover a fusão e separação dos componentes metálicos, podendo-se utilizar

técnicas como fusão, pirólise ou síntese, conforme o processo. Em seguida, a hidrometalurgia é empregada, sendo responsável pela recuperação seletiva e eficiente dos metais de interesse (OHTSUKA, 2022). Não há a possibilidade de recuperação do lítio com uma rota puramente pirometalurgia (OHTSUKA, 2022). Embora o processo seja eficaz para a recuperação de outros metais de maior valor econômico, como o cobalto e o níquel, o lítio geralmente acaba em forma de óxidos ou outros compostos que não são facilmente recuperáveis nesta etapa. A escória gerada pode conter lítio, mas a extração subsequente exigiria uma etapa adicional de lixiviação

2.3 HIDROMETALURGIA

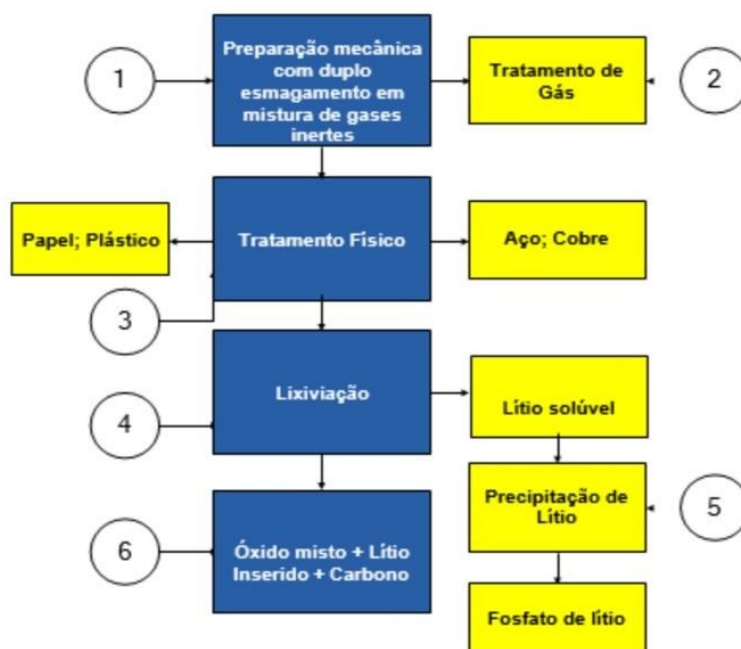
A hidrometalurgia é uma técnica amplamente utilizada para a extração e recuperação de metais, caracterizada pelo uso de soluções aquosas para solubilizar metais a partir de minérios e resíduos. Esse processo é composto por várias etapas, sendo a lixiviação uma das mais importantes. A lixiviação consiste na dissolução seletiva dos metais de interesse a partir de sólidos, realizada por meio de soluções aquosas contendo ácidos, bases ou agentes complexantes, em condições controladas de pressão, temperatura e concentração de reagentes. A eficiência da lixiviação é um fator determinante para otimizar a recuperação de metais, pois permite minimizar as perdas de material valioso, reduzir o consumo de água e limitar a geração de resíduos indesejáveis (COSTA, 2022). Posteriormente, etapas como a precipitação, a adsorção e a eletrodeposição podem ser aplicadas para purificar e isolar os metais recuperados, completando o ciclo de extração de maneira eficiente e ambientalmente responsável.

Essa abordagem apresenta vantagens significativas, pois requer menor consumo de energia em comparação com a pirometalurgia, permitindo a recuperação de metais a temperaturas mais baixas e reduzindo a emissão de poluentes para a atmosfera. No entanto, a hidrometalurgia enfrenta desafios consideráveis, incluindo o gerenciamento dos efluentes gerados, a necessidade de pré-tratamentos específicos para melhorar a eficiência do processo e o elevado consumo de água, o que pode limitar sua sustentabilidade em larga escala (OHTSUKA, 2022).

A recuperação do cobre através dos resíduos eletrônicos é um destaque na rota hidrometalúrgica (COSTA, 2022). A principal vantagem desse processo é a seletividade, na qual permite a extração eficiente do cobre com menor índice de contaminantes. A solubilização do cobre em soluções aquosas, seguida por processos de extração por solvente e eletrodeposição, possibilita a obtenção de um produto de alta pureza e reduz o consumo energético quando comparado a rota pirometalúrgica.

Para a recuperação de lítio presente em baterias primárias e secundárias por meio de uma rota hidrometalúrgica, o processo desenvolvido pela Recupyl SA se destaca como uma alternativa eficiente e sustentável. Esse processo foi testado na França e implementado em Cingapura, demonstrando uma capacidade de processamento de até 320 toneladas por ano (TPA) de baterias de lítio. A metodologia combina etapas de tratamento físico e químico, resultando na recuperação do lítio na forma de carbonato de lítio, um composto de alto valor que pode ser reutilizado na produção de novas baterias ou em diversas aplicações industriais (GOMES; MILKE, 2022). A Figura 4 apresenta um fluxograma do processo, ilustrando as diferentes etapas envolvidas e os produtos obtidos na extração e purificação do lítio.

Figura 4 - Diagrama do processo Recupyl para recuperação dos metais provenientes de baterias de lítio



Fonte: (GOMES; MILKE, 2022)

Além disso, a hidrometalurgia oferece flexibilidade no tratamento de diferentes tipos de resíduos, permitindo a adaptação das condições de lixiviação e dos reagentes empregados. A menor geração de gases tóxicos, juntamente com a possibilidade de recuperação de outros metais presentes nos resíduos, são benefícios adicionais associados a essa rota, tornando-a uma alternativa ao tratamento de resíduos eletrônicos. No entanto, apesar das vantagens apresentadas, há desvantagens significativas que devem ser consideradas, onde destaca-se o tempo de

processamento mais longo, além da necessidade de utilização de reagentes químicos, que podem ser corrosivos e apresentar riscos ambientais se não forem manuseados adequadamente.

2.4 BIOLIXIVIAÇÃO

Diversos métodos são aplicados industrialmente para recuperar metais de alto valor presentes no e-lixo. Embora sejam amplamente utilizados, esses métodos apresentam desafios significativos, pois tendem a ter altos custos operacionais, elevado consumo energético e, muitas vezes, resultam na geração de resíduos perigosos que demandam tratamentos adicionais. Esses impactos ambientais ressaltam a necessidade de desenvolver tecnologias mais sustentáveis e economicamente viáveis para o processamento de resíduos eletrônicos (ADETUNJI, 2023). A biolixiviação surge como uma excelente alternativa para a recuperação desses metais, pois é um processo com menor consumo de energia e água, menor geração de resíduos e emissões de gases poluentes, eficiente com alta capacidade de recuperação de metais, inclusive de minérios complexos e de baixo teor, com seletividade reduzindo a necessidade de purificação posterior (MINISTÉRIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA, 2010).

A biolixiviação é um processo biotecnológico que utiliza micro-organismos para solubilizar e extrair metais de minérios e outros materiais. Essa técnica se baseia na capacidade dos microrganismos de oxidar minerais sulfetados, liberando os metais presentes em sua forma solúvel (MINISTÉRIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA, 2010). É considerado um método simples, eficaz, barato, tecnológico, ecológico e com menor necessidade energética (ADETUNJI, 2023).

Ao analisar os três principais métodos utilizados na recuperação de metais, é notável que cada um apresenta vantagens e desvantagens específicas, conforme exemplificado na Quadro 2. Os pesquisadores JI et al. (2022) também realizaram uma comparação detalhada das técnicas de tratamento aplicadas a placas de circuito impresso (WPCB), conforme mostrado no Quadro 3. Cada procedimento possui suas particularidades e desafios, considerando os metais de interesse no processo, se faz necessário um estudo que discuta qual a melhor abordagem técnica e econômica para cada caso específico

Quadro 2 - Comparação entre os principais métodos de recuperação de metais provenientes do e-lixo.

Técnica	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Pirometalurgia	Utiliza altas temperaturas para fundir e purificar metais.	● Alta eficiência na recuperação de metais preciosos. ● Capacidade de tratar grandes quantidades de material. ● Produz materiais metálicos de alta pureza.	● Altos custos de energia e operação. ● Emissão de gases poluentes. ● Geração de resíduos sólidos
Hidrometalurgia	Envolve a dissolução de metais em soluções aquosas	● Menor consumo de energia em comparação à pirometalurgia. ● Menor impacto ambiental (menos emissões gasosas). ● Flexibilidade em relação aos tipos de metais recuperados.	● Menos eficiente para certos metais. ● Dependente da qualidade da água utilizada. ● Risco de contaminação do meio ambiente.
Biolixiviação	Utiliza microrganismos para a extração de metais.	● Processo ambientalmente amigável e sustentável. ● Menor custo de operação. ● Pode recuperar metais a partir de minérios de baixa lei.	● Lento em comparação com os outros métodos ● Eficiência afetada por condições do meio lixivante ● Técnica em desenvolvimento

Fonte: elaborada pela autora

Quadro 3 - Comparação de diferentes tecnologias no tratamento de WPBC

Tecnologias	Vantagens	Desvantagens
Separação físico-mecânica	Operação simples, bom benefício econômico e pequena poluição ambiental.	Os metais recuperados precisam ser refinados. Frações não metálicas são geradas e a redução de volume não é significativa.
Pirometalurgia	Redução significativa de volume, alta eficiência de tratamento.	Alto consumo de energia e investimento de capital elevado.
Eletrólise	Fluxograma simples, baixo consumo de energia, alta produção e baixa poluição ambiental.	A sucata eletrônica (WPCB) precisa ser pré-tratada, ou seja, pré-lixiviação ou oxidação com água supercrítica.
Hidrometalurgia	Processo curto, alta eficiência.	Consome grandes quantidades de reagentes químicos e gera grande volume de efluentes.
Fluidos supercríticos	Processo curto, alta eficiência.	Alto consumo de energia e baixa capacidade de tratamento.
Bioliexiviação	Benefícios em termos de baixo custo e menor impacto ambiental.	Eficiência relativamente baixa e processo demorado.

Fonte: Modificado de JI et al., 2022a

3 A CONSOLIDAÇÃO DA BIOLIXIVIAÇÃO AO LONGO DOS ANOS: Uma abordagem sustentável para recuperação de metais.

O primeiro registro documentado do processo de biolixiviação foi do cobre por volta de 162 a.C. O próximo registro na literatura foi em 1752, onde reconheceu-se a técnica como um método oficial de extração de minérios utilizando recursos biológicos, na mina Rio Tinto, localizada na Espanha. No entanto, foi somente no ano de 1958, que os pesquisadores Brayner e Jameson propuseram formalmente o uso de micro-organismos para a lixiviação do cobre (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, 2014).

O processo de lixiviação biológica faz uso de uma variedade de microrganismos, frequentemente combinando mais de um tipo. Os microrganismos mais comumente empregados são bactérias quimiotróficos, bactérias heterotróficas e fungos (JI et al., 2022b). Os micróbios secretam metabólitos que facilitam a solubilização e mobilização de metais insolúveis presentes no lixo eletrônico (ADETUNJI, 2023).

As técnicas primárias empregadas na implementação dos processos de biolixiviação incluem a lixiviação em pilhas (*heap leaching*), a lixiviação em montes (*dump leaching*) e a lixiviação em tanques agitados, como citado por WATLING (2006). Estas técnicas são comumente aplicadas em larga escala, no contexto industrial. Além disso, há vários estudos recentes que exploram técnicas de biolixiviação em escala laboratorial, tais como lixiviações por percolador, lixiviação submersa e lixiviação em coluna (JI et al., 2022b).

Na biolixiviação de baterias e celulares usados, várias etapas distintas são observadas, com cada microrganismo desempenhando um papel único. Na fase de pré-tratamento, as baterias e celulares são desmontados para separação de componentes, seguido pela trituração dos materiais para aumentar a área de contato com os microrganismos, e a classificação dos materiais para otimizar o processo. Na etapa de lixiviação, o material triturado é exposto a uma solução nutritiva juntamente com os microrganismos. Durante esta fase, os micróbios oxidam, reduzem ou complexam os metais, tornando-os solúveis em água. O controle preciso do pH e da temperatura é essencial para o sucesso do processo. A próxima etapa é a de separação, na qual os metais são isolados por métodos como precipitação, adsorção ou troca iônica. Finalmente, ocorre a purificação desses elementos. Nesta etapa, uma variedade de técnicas pode ser aplicada, cuja escolha depende da pureza e qualidade desejada do produto.

ADETUNJI et al. (2023) destacaram a eficiência de bactérias acidófilas na biolixiviação dos metais provenientes do e-lixo (Quadro 4). O estudo observa que o *Acidithiobacillus ferrooxidans* é um microrganismo versátil, capaz de ser empregado em diferentes fontes metálicas. Sob diferentes condições de operação, este microrganismo demonstra a capacidade de recuperar mais de um tipo de metal. Apesar de ser em menor número de estudos publicados, há trabalhos também que abordam outras bactérias, principalmente, também acidófilas, outras heterotróficas, sendo sistema de cultura pura ou consórcio microbiano ou ainda, sistemas que empregam fungos filamentosos.

Quadro 4 - Eficiência da biolixiviação de em diferentes fontes metálicas.

Bactéria	Fonte de Metal	Eficiência de Recuperação (%)	Condições de Biolixiviação
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Placa de circuito impresso (PCB)	Cu (80%)	pH 2,0; temperatura 30 °C; tempo de incubação 2 dias
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	PCB de celular usado	Cu (98%); Ni (82%)	160 rpm; 30 °C; 72 h
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Telas sensíveis ao toque OLED de celular	In (100%); Sr (5%)	pH inicial 1,1; 29 °C; 140 rpm; 15 dias
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	Baterias de níquel-cádmio	Cd (100%); Ni (96,5%); Fe (95%)	pH 2,0; temperatura 30 °C; tempo de incubação 93 dias; densidade de polpa 0,2 g/L
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Baterias de níquel-cádmio	Co (100%)	pH 1,5; temperatura 30 °C; tempo de incubação 28 dias
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	PCB de celular	Cu (99%); Ni (99%)	170 rpm; temperatura 30 °C; pH inicial 1,0; densidade de polpa 9,25 g/L; Fe ³⁺ 4,17 g/L; tempo de incubação 55 dias
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Baterias de íon de níquel	Co (65%)	pH 2,5; temperatura 30 °C; tempo de incubação 20 dias; densidade de polpa 5 g/L
<i>Acidithiobacillus thiooxidans</i>	PCBs de computador	Cu (75%)	Densidade de polpa 0,7%; 9 dias
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Baterias de íon de níquel	Co (99,9%)	pH 3,0; temperatura 35 °C; tempo de incubação 6 dias
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	PCB de celular	Cu (95,92%); 93,53% (Al); 92,58% (Zn); 65,27% (Ni); 95,33% (Sn)	Temperatura 20–35 °C; concentração de PCB 5%; volume de inoculação 5% (v/v)
<i>Acidiphilium acidophilum</i>	PCBs de computador	100% (Cu)	Tempo de incubação 10 dias; H ₂ O ₂ 30%
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	PCB de celular	95%–100% (Cu)	Temperatura de incubação 30 °C; 130 rpm; densidade de polpa 7,5 g/L; 48 h
<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	PCBs de computador	92% (Cu)	pH 1,8; densidade de polpa 35 g/L; 30 °C; 170 rpm

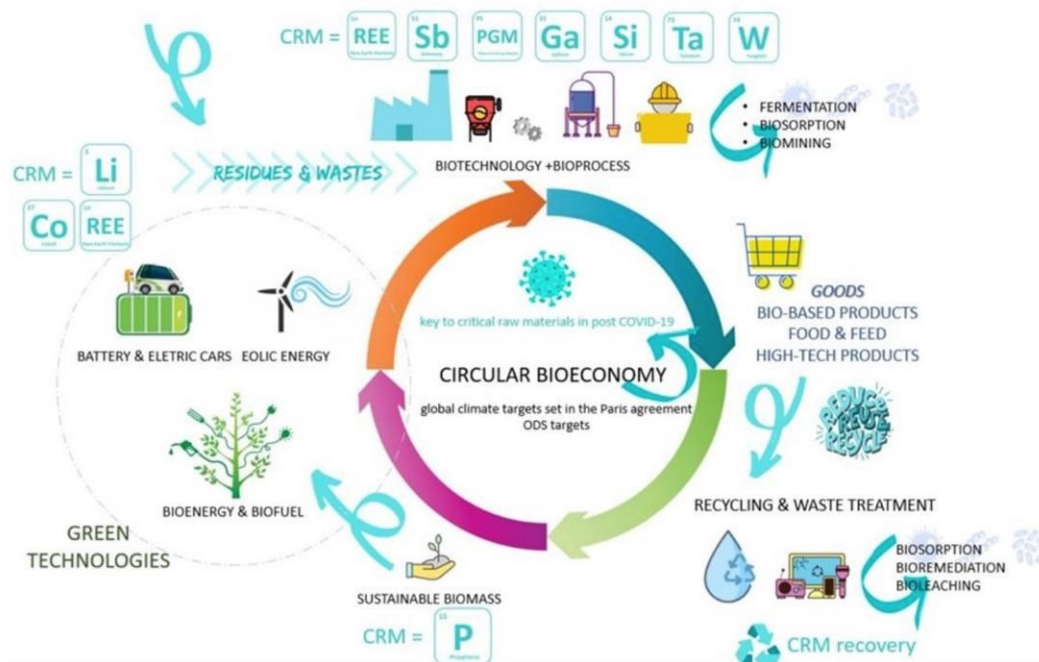
Fonte: Modificado de ADETUNJI et al., 2023

Diferentemente, das bactérias acidófilas, outras espécies de agentes biológicos produzem ácidos orgânicos que são biodegradáveis. Neste caso, a ação do processo biológico pode ser considerada de duas formas: a biolixiviação em uma etapa (a lixiviação dos metais na presença dos microrganismos) ou a biolixiviação em duas etapas (1ª etapa de produção de meio lixivante por fermentação e 2ª etapa da lixiviação dos metais empregando o meio produzido na 1ª etapa). Para a segunda alternativa, variáveis de processo são investigadas no intuito de produzir um meio lixivante com alta concentração de ácidos orgânicos e outros compostos que auxiliam na biossolubilização dos metais como compostos antioxidantes e quelantes.

A biolixiviação ainda está em desenvolvimento e enfrenta alguns desafios, principalmente, quando trata-se de celulares e baterias usadas. Por ser uma matriz complexa com presença de substância tóxica exige adaptação dos microrganismos. Uma das alternativas para melhorar a eficiência do processo é o uso de culturas mistas proposta por LIU et al., 2024. Outra alternativa a ser analisada é a adaptação dos microrganismos, no estudo apresentado por HARUE YAMANE; et al. (2011), em que a adaptação da bacteriana aumentou a tolerância dos microrganismos aos íons gerados durante o processo de oxidação dos metais contidos nas placas de circuito impresso.

Apesar de ser uma abordagem consideravelmente nova, com bastante a ser melhorada para uma aplicação em grande escala, a biolixiviação revolucionou o setor industrial no quesito de sustentabilidade, e é crescente a transição para métodos baseados em processos biológicos (ARTEIRO et al., 2022). Na Figura 5 observa-se uma proposta de estrutura setorial para a biomineração urbana focada na recuperação de matérias-primas críticas.

Figura 5 - Modelo de arranjo setorial para uma bioeconomia circular centrada na mineração urbana de matérias-primas críticas.



Fonte: (ARTEIRO et al., 2022)

3.1 Parâmetros que influenciam no processo biometalúrgico

Na biolixiviação, uma série de parâmetros influencia diretamente a eficiência com que microrganismos extraem metais de minérios. Dentre os principais fatores estão a temperatura, pH, disponibilidade de oxigênio e nutrientes, bem como a concentração de íons metálicos no meio. A temperatura e o pH, por exemplo, afetam o metabolismo das bactérias e fungos envolvidos no processo, e cada um desses microrganismos possuem uma faixa ideal para esses parâmetros. Além disso, o oxigênio e os nutrientes são essenciais para sustentar o crescimento microbiano e garantir que as reações de oxidação dos metais ocorram de forma eficiente (YAMANE; ESPINOSA; TENÓRIO, 2011; MORALIS et al., 2024).

O controle desses parâmetros é necessário para otimizar a taxa de extração de metais e evitar problemas que possam inibir o crescimento dos microrganismos, como a presença excessiva de íons metálicos que, em altas concentrações, podem ser tóxicos. Ajustar o tamanho das partículas do minério também é fundamental, pois partículas menores aumentam a superfície de contato, facilitando o acesso dos microrganismos aos metais-alvo. Dessa forma, compreender e ajustar esses parâmetros contribui para maximizar a eficiência do processo de biolixiviação e torná-lo economicamente viável (GIESE, 2017).

3.1.1 Adaptação bacteriana e suplementação de ferro

O processo biolixiviação bacteriana é um processo complexo influenciado por diversos fatores, incluindo a composição mineralógica do resíduo, a concentração de metais, o pH e a temperatura. A adaptação das bactérias a essas condições é fundamental para garantir a eficiência e a viabilidade do processo (CARDOSO, 2022).

A biolixiviação depende em grande medida da capacidade de adaptação das bactérias ao ambiente hostil e complexo dos resíduos minerais. Estudos como o de ADETUNJI et al. (2023) apontaram que a adaptação bacteriana aumenta significativamente a taxa de extração de metais, pois os microrganismos desenvolvem mecanismos para tolerar os íons metálicos liberados durante o processo, além de otimizar seus mecanismos de oxidação e solubilização.

A adaptação bacteriana e a suplementação de ferro são alternativas usadas para otimizar o processo de biolixiviação, especialmente quando analisamos a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans*, conhecida por sua capacidade de oxidar compostos de ferro e enxofre (VERA; SCHIPPERS; SAND, 2013). A adaptação bacteriana refere-se ao processo pelo qual microrganismos ajustam seus sistemas enzimáticos e metabólicos para tolerar condições adversas, como altas concentrações de metais pesados, durante a adaptação as bactérias desenvolvem resistência gradual a concentrações crescentes de substratos e íons metálicos presentes no meio no meio lixiviante, permitindo uma maior eficiência na solubilização de metais em ambientes ácidos e ricos em minerais (YAMANE; ESPINOSA; TENÓRIO, 2011). Esse ajuste é crucial para que as bactérias se mantenham ativas em ambientes de lixiviação industrial, onde são expostas a níveis crescentes de toxicidade ao longo do tempo (OZKAYA et al., 2007).

A suplementação de ferro, especialmente na forma de íons Fe^{2+} , desempenha um papel central nesse processo ao fornecer um substrato essencial para a atividade metabólica das bactérias. Esses íons são frequentemente adicionados ao meio de lixiviação para garantir que as bactérias mantenham altos níveis de oxidação, o que é fundamental para a recuperação de metais em sistemas de biolixiviação. Estudos mostram que, em ambientes onde a concentração de ferro é baixa, a taxa de oxidação de metais pelas bactérias pode diminuir significativamente, comprometendo a eficiência do processo (YAMANE; ESPINOSA; TENÓRIO, 2011; VERA; SCHIPPERS; SAND, 2013).

No caso do estudo feito por YAMANE et al. (2011), a biolixiviação se mostrou uma técnica promissora para a recuperação de cobre de placas de circuito impresso. Utilizando bactérias como a *Acidithiobacillus ferrooxidans-LR* e a adição de íons de ferro, foi possível extrair 56% do cobre presente no material. Essa técnica é vantajosa, pois reduz a necessidade de insumos químicos e diminui a emissão de poluentes gasosos.

A interação entre adaptação bacteriana e suplementação de ferro também influencia a resistência das bactérias às variações ambientais, como mudanças na acidez e na concentração de metais. Essa capacidade adaptativa permite que os microrganismos se proliferem e mantenham sua atividade oxidativa em condições desafiadoras, como é o caso de rejeitos de mineração e minérios de baixo teor. Portanto, o controle dos níveis de ferro e a adaptação contínua das populações bacterianas são estratégias essenciais para maximizar a solubilização dos metais e tornar o processo mais sustentável e eficiente em escala industrial (VERA; SCHIPPERS; SAND, 2013; OZKAYA et al., 2007)

3.1.2 O pH e a Temperatura

O pH do meio reacional desempenha um papel fundamental na biolixiviação, afetando a atividade metabólica dos microrganismos, a solubilidade dos metais e a formação de precipitados. O pH indicado é o ácido e está na faixa de 1,5 a 3,5, é o ideal para a atividade de bacteriana utilizadas no processo (ADETUNJI; OBERHOLSTER; ERASMUS, 2023). Nessa faixa, a solubilidade de metais pesados, como cobre e ouro, aumenta consideravelmente, facilitando sua extração. No entanto, pHs extremamente baixos podem inibir o crescimento bacteriano e prejudicar a eficiência do processo. Além disso, o pH influencia a formação de espécies químicas dos metais, podendo favorecer a precipitação de hidróxidos metálicos em pHs mais elevados, o que diminui a eficiência da extração (ROHWERDER et al., 2003).

A temperatura, por sua vez, influencia a cinética das reações bioquímicas e a atividade enzimática dos microrganismos. A maioria das bactérias utilizadas em biolixiviação são mesófilas, com temperatura ótima de crescimento entre 25 e 35°C. No entanto, algumas espécies são termófilas, capazes de operar em temperaturas mais elevadas. A temperatura pode afetar a permeabilidade da membrana celular, a solubilidade de gases e a viscosidade do meio, influenciando diretamente a biolixiviação (WATLING, 2006b). Temperaturas elevadas podem aumentar a taxa de reação, mas também podem causar desnaturação de proteínas e inibir o crescimento bacteriano.

O pH e temperatura de processo é variável de acordo com o microrganismo utilizado, a composição do e-lixo e dos metais a serem extraídos. Em alguns casos, a combinação de pH e temperatura ótimos pode resultar em um efeito sinérgico, aumentando significativamente a eficiência da biolixiviação

3.1.3 Influência de oxigênio e nutrientes

A biolixiviação de e-lixo, especialmente na extração de metais presentes em placas de circuito impresso (PCBs), é um processo influenciado fortemente pela disponibilidade de oxigênio e nutrientes. Esses fatores desempenham um papel crucial, pois afetam diretamente o crescimento e a atividade das bactérias acidofílicas e quimioautotróficas que promovem a oxidação dos metais, facilitando sua dissolução e extração. O oxigênio é essencial para o metabolismo dessas bactérias, especialmente aquelas que oxidam o ferro e o enxofre, como *Acidithiobacillus ferrooxidans*, amplamente utilizadas na biolixiviação. A insuficiência de oxigênio pode limitar a eficiência de oxidação, resultando em uma redução na taxa de liberação de íons metálicos das PCBs. Em experimentos com biorreatores aerados, o controle da concentração de oxigênio se mostrou vital para sustentar a atividade bacteriana e maximizar o rendimento de extração de metais como cobre e ouro presentes no e-lixo (RENDÓN-CASTRILLÓN et al., 2023; ANAYA-GARZON et al., 2021).

Além do oxigênio, os nutrientes também desempenham um papel crítico. Elementos como nitrogênio, fósforo, e magnésio são necessários para o crescimento bacteriano e devem estar presentes em concentrações adequadas no meio de cultura. Em estudos recentes, verificou-se que meios suplementados com sulfato de amônio e outras fontes minerais ajudam a manter a saúde e a eficácia das colônias bacterianas, aumentando a taxa de biolixiviação dos metais das PCBs. Em condições experimentais com diferentes concentrações de PCBs e ajustes na quantidade de nutrientes, observou-se que a eficiência de extração dos metais variava, destacando a importância de uma formulação balanceada do meio para evitar limitações nutricionais que possam comprometer o processo (ADETUNJI; OBERHOLSTER; ERASMUS, 2023).

3.1.4 O papel dos quelantes na bio-extração de metais de resíduos eletrônicos

Quelantes são compostos orgânicos ou inorgânicos que formam complexos estáveis com íons metálicos, sequestrando-os em solução, ou seja, formam complexos solúveis que facilitam a extração de metais de minérios de baixo teor ou de resíduos eletrônicos. Por essa

ação, os quelantes são usados em processos de remediação, como no caso de tratamento de solos contaminados por metais pesados por fitorremediação como reportado no trabalho de Zheng et al. (2024)

Durante a biolixiviação, os quelantes podem ser metabólitos do microrganismo usado no processo biológico, ou ser adicionados, podendo ser sintéticos ou ainda de origem biológica. Em quaisquer das duas situações, há uma grande vantagem quando o agente quelante é biodegradável, pois não representa um resíduo no final do processo (RENDÓN-CASTRILLÓN et al., 2023).

O processo de biolixiviação, que utiliza esses quelantes, não apenas melhora a eficiência na extração de metais, mas também promove uma abordagem mais sustentável em comparação aos métodos tradicionais, reduzindo a necessidade de produtos químicos agressivos e minimizando os impactos ambientais associados à mineração e reciclagem (SARKODIE et al., 2022). Nesta questão, eles têm um papel central na extração de metais de minérios de baixo teor, sendo uma estratégia adotada onde impacto ambiental de processos tradicionais, como a lixiviação química, são extremos (SARKODIE et al., 2022). Os quelantes também podem ser um componente crítico na adaptação de processos biológicos a diferentes condições ambientais, otimizando a extração de metais em condições desfavoráveis, como pH ácido ou presença de contaminantes (RENDÓN-CASTRILLÓN et al., 2023). Além disso, por permitir aumentar a eficiência da biolixiviação, processo em temperaturas e pressões mais amenas, resultando em um consumo energético reduzido e gerando menos resíduos tóxicos em comparação com técnicas como a pirometalurgia e a hidrometalurgia, que frequentemente utilizam ácidos fortes e produtos químicos perigosos (ADETUJI et al., 2023).

Para o caso em que os agentes quelantes são secretados por diferentes espécies bacterianas, no Quadro 5 são destacados alguns dos principais ácidos quelantes, de produção bacteriana, e o tipo de metal eletrônico oriundo do respectivo e-lixo que é utilizado como fonte para extração de metais no processo de biolixiviação. O uso de ácidos como o ácido sulfúrico e o ácido cítrico demonstra grande eficácia na extração de metais como cobre e zinco em resíduos de placas de circuito, uma prática comum na reciclagem de e-lixo (ADETUJI et al., 2023; RENDÓN-CASTRILLÓN et al., 2023).

Quadro 5 - Utilização bactérias produtoras de quelantes na biolixiviação do lixo eletrônico

Agente quelante	Bactéria produtora	Fonte metálica do e-lixo	Metal recuperado
Ácido glicônico	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Resíduos de placas de circuito impresso	Cobre
Ácido sulfúrico (gerado indiretamente)	<i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	Resíduos de bateria de ion-lítio	Lítio, cobalto e níquel
Ácido cítrico	<i>Bacillus megaterium</i>	Resíduos de placas de circuito impresso	Alumínio e ferro
Ácido láctico	<i>Lactobacillus spp.</i>	Resíduos de componentes eletrônicos	Ferro e cobre
Ácido succínico	<i>Actinobacteria spp.</i>	Resíduos de componentes eletrônicos	Zinco e cobre
Ácido malônico	<i>Pseudomonas putida</i>	Resíduos de cabos e conectores	Níquel e cromo
Ácido ascórbico	<i>Acinetobacter spp.</i>	Resíduos de placas de circuito impresso	Cobre e estanho

Fonte: Elaborado pela Autora

Como foi citado anteriormente, em menor número de estudos, mas também promissores, é a biolixiviação por fungos. Como informado no trabalho de Deepatana e Valix (2006), bactérias heterotróficas e os fungos dos gêneros *Aspergillus* e *Penicillium* têm potencial para biolixiviação. No estudo desenvolvido por estes autores, foi avaliada a complexação de ácidos orgânicos: cítrico, málico e láctico a partir de soluções de biolixiviação sintéticas foram preparadas pela adição dos reagentes $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ em soluções de 0,01 M a 0,1 M dos ácidos orgânicos, uma vez que essas são concentrações normalmente obtidos pelos fungos.

O efeito da adição de agentes quelantes (Ácido etilenodiamino tetraacético (EDTA), ácido etilenodiaminodisuccínico (EDDS), dietilenotriamina pentaacetato (DTPA), ácido nitrilotriacético (NTA), ácido cítrico e ácido oxálico) foi investigado por Shah et al. (2015) para a bioextração de Cu, Zn e Ni de placas de circuito impresso de computador (c-PCB). Ao meio contendo 10 g/L de pó de c-PCB, foram adicionados 0,1% do quelante. Os pesquisadores observaram que a ordem de eficiência foi diferente entre os metais recuperadas. A ordem de eficiência para a extração do Cu foi $\text{EDDS} > \text{EDTA} > \text{NTA} > \text{sem quelante} > \text{ácido cítrico} > \text{DTPA} > \text{ácido oxálico}$. Vale destacar que para os três primeiros, a remoção de Cu foi de 88.50 e 89.60% para um tempo de 3 dias, quanto o processo sem quelante foi de 8 dias. Para o Ni foi, na extração foi maior sem quelante, sendo que os autores não encontraram justificativas para este resultado. A ordem de extração do Zn foi $\text{ácido oxálico} > \text{EDDS} > \text{EDTA} > \text{NTA} > \text{sem}$

quelante > DTPA > ácido cítrico, sendo que na ausência de quelante, 96,20% foi recuperado em 6 dias de reação e 99,99% na presença de 0,1% de ácido oxálico em 2 dias.

Deve-se destacar ainda deste trabalho que a diferença de extração entre EDDS e EDTA para Cu e Zn foi desprezível e como o EDTA é um composto orgânico de baixa biodegradabilidade, o uso do EDDS é uma alternativa para aumentar a taxa de remoção dos metais de c-PCB.

No estudo desenvolvido por Ilkhani et al. (2024), o ácido oxálico foi usado como meio lixiviante e também quelante, em um processo híbrido para extração de metais, sendo a 1ª etapa química (lixiviação por ácido oxálico) e a 2ª etapa biológica *Bacillus foraminis* (bactéria heterotrófica e alcali-tolerante) para a recuperação dos metais e elementos de terra rara encontrados na lama vermelha, um subproduto da indústria de alumina. De acordo com os pesquisadores, o ácido oxálico é em mais forte acidez e maior capacidade quelante em comparação com os ácidos acético, fórmico e cítrico, agindo no enfraquecimento das ligações químicas na matriz sólida e formando complexos solúveis com vários metais. O processo híbrido proposto, usando 0,23 M de ácido oxálico, a 80 °C e agitação de 200 rpm por 4h, com razão sólido/líquido de 10 g/L, permitiu uma recuperação de Fe de 98.4 %, de Al de 98.4 % e de Ti de 80 %, que dificultaria a biolixiviação dos elementos de terra rara pelo bacilo na etapa de biolixiviação.

No trabalho de Castro et al. (2016), a biolixiviação de jarositas por *Aeromonas hydrophila* (redutora de ferro) foi investigada, usando como quelantes (60 mM) o ácido cítrico e o EDTA, sendo que para ambos a taxa de dissolução aumentou. O estudo mostrou que, na ausência de quelante, em 15 dias de reação, somente 0,7% do Fe(III) foi solubilizado e na presença do ácido cítrico e de EDTA, essa percentagem foi de 76% e 80%, respectivamente, em 8 dias.

Estes resultados mostram que o uso de agentes quelantes aumenta a taxa de recuperação, aumentando a eficiência da biolixiviação, visto que o tempo do processo é uma limitação desta técnica, devendo levar em consideração que o efeito do quelante pode ser diferente dependendo do metal a ser recuperado da matriz do lixo eletrônico.

4 CONSIDERAÇÕES GERAIS – RECUPERAÇÃO DO LÍTIO: Entre a demanda crescente, a sustentabilidade ambiental e a promessa da biolixiviação.

As preocupações decorrentes das mudanças climáticas devido ao efeito estufa estão em constante crescimento, uma vez que impactam diretamente na qualidade de vida e na existência humana (AHMED et al., 2020). Sendo assim, a busca por uma energia renovável é urgente e é nesse cenário que entra as baterias de lítio, ou íons lítio (LIBs).

As baterias de íons de lítio (LIBs) são amplamente utilizadas em todo o mundo devido às suas múltiplas vantagens, incluindo alta densidade de energia, longos ciclos de vida, alta tensão de descarga e design leve (LIU et al., 2024). Sua eficácia é comprovada pelo uso em grandes empresas, como Tesla e Apple. Com o aumento da adoção das baterias de íons de lítio, também cresce o descarte dessas baterias usadas. A biolixiviação surge como uma aliada no processo de recuperação das LIBs gastas, evitando o desperdício de metais preciosos como lítio e cobalto, além de reduzir a ecotoxicidade e os problemas de saúde pública associados.

A hidrometalurgia é responsável por grande parte dos processos de recuperação do lítio e do cobalto, entretanto a bio-hidrometalurgia vem substituindo esse processo devido a sua maior eficiência e menor custo. O microrganismo que vem sendo estudado e utilizado para essa finalidade é a *Acidithiobacillus ferrooxidans* (MISHRA et al., 2008). Essa bactéria é oxidante do ferro e enxofre, produz ácido sulfúrico, que contribui para a dissolução da matriz dos materiais, é tolerante a pH baixo e temperaturas elevadas.

Todavia, embora seja uma opção atraente, o processo de biolixiviação, mesmo considerando que o agente biológico produza quelantes, apresenta desafios, uma vez que a eficiência na biolixiviação das baterias íons lítio usadas ainda é baixa.. Em primeiro lugar, a taxa de lixiviação bacteriana tende a ser mais lenta em comparação com métodos químicos tradicionais, o que pode limitar sua aplicação em larga escala industrial. Outro desafio é a necessidade de controle rigoroso das condições de pH e temperatura para otimizar o crescimento das bactérias e a produção dos quelantes. Em escalas maiores, o controle dessas variáveis se torna mais complexo e pode impactar a eficácia do processo.

Pensando nisso, Liu et al. (2024) propuseram um sistema utilizando pirita bifuncional, combinada com enxofre elementar e *Aspergillus niger*. O estudo mostra também que culturas

mistas de *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans* tem uma maior eficiência de lixiviação quando comparadas a uma cultura pura.

Além de alternativas como o estudo de Liu et al (2024), para superar os desafios uma proposta é também investir em genômica, proteômica e metabolômica, que vêm auxiliando no desenvolvimento de cepas bacterianas com capacidade de biolixiviação otimizada para diferentes tipos de minérios. Essas técnicas permitem que os pesquisadores manipulem ou selecionem cepas de bactérias com melhor adaptação a condições extremas de pH e temperatura, aumentando, assim, a eficiência e a sustentabilidade do processo. Além disso, o uso de biofilmes, uma estrutura que facilita a adesão bacteriana às superfícies minerais, é uma área de pesquisa promissora, pois potencializa a formação de microambientes otimizados para a lixiviação.

5 Perspectivas para Pesquisas Futuras

Futuras investigações podem concentrar-se no aprimoramento da adaptação microbiana para otimizar a eficiência da biolixiviação na recuperação de metais provenientes de resíduos eletrônicos. A indução adaptativa de microrganismos por meio da exposição gradual a elevadas concentrações de metais tóxicos pode favorecer a seleção de cepas mais tolerantes e metabolicamente ativas. Estudos prévios indicam que a bactéria *Acidithiobacillus ferrooxidans* apresenta maior eficiência na oxidação de metais quando cultivada em meios enriquecidos com ferro, demonstrando um potencial significativo na recuperação de elementos como cobre e lítio. Além disso, a utilização de consórcios microbianos, como a associação entre *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Aspergillus niger*, pode ser explorada para aumentar a taxa de lixiviação e reduzir os efeitos inibitórios causados pelo acúmulo de íons metálicos no meio. O emprego de abordagens baseadas em engenharia genética e bioprocessos avançados pode viabilizar a adaptação dirigida de microrganismos, ampliando sua robustez em condições operacionais adversas.

Paralelamente, pesquisas voltadas ao emprego de quelantes biodegradáveis na biolixiviação podem contribuir para o desenvolvimento de rotas mais seletivas e ambientalmente sustentáveis na extração de metais. A produção de ácidos orgânicos complexantes por microrganismos, como *Pseudomonas aeruginosa* e *Bacillus megaterium*, destaca-se como um mecanismo promissor para a solubilização seletiva de metais, minimizando a necessidade de reagentes sintéticos agressivos. Compostos como ácido

glicônico e ácido cítrico, já identificados em estudos prévios, apresentam potencial para serem otimizados por meio da modulação de parâmetros fermentativos e da engenharia metabólica das cepas produtoras. Além disso, a integração de quelantes biodegradáveis ao processo de biolixiviação pode ser avaliada em associação a métodos híbridos, como adsorção seletiva e extração por solventes ecológicos, visando aumentar a recuperação de metais de alto valor agregado e reduzir a geração de resíduos secundários.

6 CONCLUSÃO

A crescente produção de lixo eletrônico representa um dos principais desafios ambientais e econômicos da sociedade moderna. Este trabalho destacou a recuperação sustentável de metais a partir do lixo eletrônico utilizando a biolixiviação como uma técnica promissora e ambientalmente responsável.

Ao analisar as principais técnicas de recuperação de metais — pirometalurgia, hidrometalurgia e biolixiviação —, foi possível compreender as vantagens e desvantagens de cada método e, especialmente, o potencial que a biolixiviação apresenta para a sustentabilidade. Enquanto a pirometalurgia e a hidrometalurgia requerem altos custos energéticos e geram resíduos tóxicos, a biolixiviação oferece um processo mais sustentável, utilizando microrganismos que tornam o processo de extração de metais menos agressivo ao meio ambiente.

O estudo também abordou a importância da escolha de microrganismos específicos e a otimização das condições do processo, como pH, temperatura e suplementação de nutrientes, para melhorar a eficiência de extração. A recuperação de metais como lítio e cobre, presentes em componentes eletrônicos como baterias, é essencial não só para a economia circular, mas também para a redução da exploração de recursos naturais finitos. Este método sustentável contribui tanto para a preservação de recursos naturais quanto para a criação de novas oportunidades de mercado.

Apesar dos avanços, o processo de biolixiviação tem enfrentado alguns desafios, como a necessidade de adaptações para lidar com a toxicidade de certos metais e a complexidade dos componentes eletrônicos. Para a aplicação em larga escala da biolixiviação, pesquisas futuras devem explorar o desenvolvimento de microrganismos geneticamente modificados para maior

resistência e eficiência em condições de e-lixo, além da possibilidade de combinações híbridas com hidrometalurgia para maximizar a recuperação de metais. Estas inovações podem ajudar a superar as atuais limitações e viabilizar a biolixiviação como uma prática amplamente adotada pela indústria.

Enfim, a biolixiviação de baterias e celulares usados é uma tecnologia inovadora com um futuro promissor. A combinação da habilidade microbiana com o desenvolvimento de novas técnicas e infraestrutura pode transformar a indústria de reciclagem, promovendo a sustentabilidade e a recuperação eficiente de metais valiosos, contribuindo para a promoção da economia circular e para a preservação ambiental. Este trabalho reforça a relevância de investir em técnicas biotecnológicas no tratamento de resíduos, com vistas a um desenvolvimento mais sustentável no setor da engenharia e na sociedade em geral.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADETUNJI, A. I.; OBERHOLSTER, P. J.; ERASMUS, M. **Bioleaching of Metals from E-Waste Using Microorganisms: A Review**. *Minerals* MDPI, , 1 jun. 2023.
- AHMED, W. et al. The role of single end-users and producers on ghg mitigation in Pakistan—A case study. *Sustainability (Switzerland)*, v. 12, n. 20, p. 1–12, 2 out. 2020.
- ANAYA-GARZON, J. et al. Bioleaching of E-Waste: Influence of Printed Circuit Boards on the Activity of Acidophilic Iron-Oxidizing Bacteria. *Frontiers in Microbiology*, v. 12, 18 ago. 2021.
- ARTEIRO DA SILVA, K.; SILVA DE ALMEIDA, I. M.; GIOVANETTI EL-DEIR, S. **Resíduos Sólidos e Covid-19: Desafios e impactos na gestão**. [s.l: s.n.].
- Aumento na procura por carros elétricos pode levar a escassez mundial de lítio já em 2025, aponta relatório. *Época*. 04 de setembro de 2023. Negócios. Disponível em: <<https://epocanegocios.globo.com/economia/noticia/2023/09/aumento-na-procura-por-carros-eletricos-pode-levar-a-escassez-mundial-de-litio-ja-em-2025-aponta-relatorio.ghml>>. Acesso em: 20 de novembro de 2024.
- BARTHOLOMEU, D. B.; et al. **Logística Ambiental de Resíduos Sólidos**. 2ed. ed. São paulo: [s.n.].
- BLOOMBERGNEF. **Electric Vehicle Outlook 2020**.
- CARDOSO, C. A. **APLICAÇÃO DE TÉCNICAS BAYESIANAS NO PROCESSO DE BIOLIXIVIAÇÃO DE URÂNIO**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/15316/1/Dissertacao_Aplicacao_TecnicasBayesianas.pdf>. Acesso em: 31 out. 2024.
- CASARIN, R. Brasil alcança 6ª posição no ranking global de energia solar. *Portal Solar*. 28 de março de 2024. Mercado. Disponível em: <<https://www.portalsolar.com.br/noticias/mercado/internacional/brasil-alcanca-6a-posicao-no-ranking-global-de-energia-solar>>. Acesso em: 20 de novembro de 2024.
- COSTA, A. B. **ESTUDO DOS LIXIVIANTE DE ROTAS HIDROMETALÚRGICAS PARA EXTRAÇÃO DE METAIS A PARTIR DO LIXO ELETRÔNICO**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68128/1/2022_tcc_abcosta.pdf>. Acesso em: 12 out. 2024.
- CRISTINA PEDROSO MOI, P. et al. **Lixo eletrônico: consequências e possíveis soluções**. [s.l: s.n.].
- DANIEL DA CUNHA KEMERICH, P. et al. **IMPACTOS AMBIENTAIS DECORRENTES DA DISPOSIÇÃO INADEQUADA DE LIXO ELETRÔNICO NO SOLO**. [s.l: s.n.].
- DEEPATANA, A., VALIX, M. Recovery of nickel and cobalt from organic acid complexes: Adsorption mechanisms of metal-organic complexes onto aminophosphonate chelating

- resin. **Journal of Hazardous Materials**, 137 (2) 2006, 925-933, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.03.015>.
- FARIAS, A. S. **Análise da contaminação do solo por metais potencialmente tóxicos em locais de reciclagem de resíduos eletrônicos**. [s.l: s.n.].
- FREITAS CARVALHO, B. et al. *Ciência e Natura*. **Ciência e Natura**, v. 38, n. 2, p. 862–872, 2016.
- GIESE, E. C. BIOLIXIVIAÇÃO: UMA AVALIAÇÃO DAS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA BIOMINERAÇÃO DE MINERAIS SULFETADOS NO PERÍODO DE 1991 A 2015. **Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração**, v. 14, n. 3, p. 192–203, 2017.
- GOMES, W. R. C.; MILKE, E. C. Processos de reciclagem de pilhas e baterias: uma revisão dos principais métodos / Battery recycling processes: a review of the main methods. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 3, p. 17469–17484, 10 mar. 2022.
- HARUE YAMANE, L.; CROCCE ROMANO ESPINOSA, D.; ALBERTO SOARES TENÓRIO, J. **Bioliixiviação de cobre de sucata eletrônica**. [s.l: s.n.].
- ILKHANI, Z., VAKILCHAP, F., SADEGHI, N., MOUSAVI, S.M.. Base metals (Fe, Al, Ti) and rare earth elements (Ce, La, Pr) leaching from red mud through an efficient chemical-biological hybrid approach, **Minerals Engineering**, 208, 2024, 108603, <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.108603>.
- INSTITUT FÜR SELTENE ERDEN UND METALLE AG. **Cadmio 99,99%**.
- Jl, X. et al. **Bioleaching of Typical Electronic Waste—Printed Circuit Boards (WPCBs): A Short Review**. **International Journal of Environmental Research and Public Health MDPI**, , 1 jun. 2022a.
- Jl, X. et al. Bioleaching of Typical Electronic Waste—Printed Circuit Boards (WPCBs): A Short Review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 12, p. 7508, 19 jun. 2022b.
- KAINAT, S. et al. **Electrolytes in Lithium-Ion Batteries: Advancements in the Era of Twenties (2020's)**. **Materials Chemistry and Physics** Elsevier Ltd, , 1 fev. 2024.
- LIU, Z. et al. A highly efficient process to enhance the bioleaching of spent lithium-ion batteries by bifunctional pyrite combined with elemental sulfur. **Journal of Environmental Management**, v. 351, 1 fev. 2024.
- MENDONÇA, B. M. RECUPERAÇÃO DE METAIS PESADOS DE BATERIAS USADAS DE CELULARES POR BIOLIXIVIAÇÃO. 2017.
- MINISTÉRIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA, C.-C. DE T. M. **Bioliixiviação: Utilização de Micro-organismos na Extração de Metais**. [s.l: s.n.].
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA E INOVAÇÃO, C.-C. DE T. M. **Biofilmes: A interação micro-organismo/substrato mineral na bioliixiviação**. [s.l: s.n.].

- MISHRA, D. et al. Bioleaching of metals from spent lithium ion secondary batteries using *Acidithiobacillus ferrooxidans*. **Waste Management**, v. 28, n. 2, p. 333–338, 2008.
- MORALIS, N. DE L. et al. A BIOLIXIVIAÇÃO NA REABILITAÇÃO DE METAIS PESADOS DAS BATERIAS DE TELEFONES CELULARES. <https://revistaft.com.br/a-biolixiviacao-na-reabilitacao-de-metais-pesados-das-baterias-de-telefones-celulares/>, 20 maio 2024.
- MUNIZ, N. M. APLICAÇÃO DA ABORDAGEM DEMATEL PARA IDENTIFICAR E ANALISAR AS BARREIRAS PARA RECUPERAÇÃO DE METAIS A PARTIR DE REEE GERADOS NO BRASIL. [s.l: s.n.].
- OHTSUKA, R. S. ESTUDO SOBRE OS MÉTODOS DE RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE BATERIAS DE LÍTIO DE CARROS ELÉTRICOS. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/16259/Rodrigo%20Seiji%20Ohtsuka.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 30 set. 2024.
- Produção de lixo eletrônico pela humanidade chegou a 62 milhões de toneladas. **ONU News**. 22 de março de 2024. Clima e Meio Ambiente. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2024/03/1829466>>. Acesso em: 20 de novembro de 2024.
- OZKAYA, B. et al. Iron oxidation and precipitation in a simulated heap leaching solution in a *Leptospirillum ferriphilum* dominated biofilm reactor. **Hydrometallurgy**, v. 88, n. 1–4, p. 67–74, ago. 2007.
- PROVAZI, K.; CROCCE ROMANO ESPINOSA, D.; ALBERTO SOARES TENÓRIO, J. **Electrochemical study of metals recovery from spent batteries**. [s.l: s.n.].
- REDDY, T. B. **LINDEN'S HANDBOOK OF BATTERIES**. [s.l: s.n.].
- RENDÓN-CASTRILLÓN, L. et al. **Bioleaching Techniques for Sustainable Recovery of Metals from Solid Matrices**. **Sustainability (Switzerland)** Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), , 1 jul. 2023.
- ROHWERDER, T. et al. **Bioleaching review part A: Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation**. **Applied Microbiology and Biotechnology**, dez. 2003.
- SARKODIE, E. K. et al. **A review on the bioleaching of toxic metal(loid)s from contaminated soil: Insight into the mechanism of action and the role of influencing factors**. **Frontiers in Microbiology**. Frontiers Media S.A., , 7 dez. 2022.
- SHAH, M.B., TIPRE, D.R., PUROHIT, .S., DAVE, S.R. Development of two-step process for enhanced biorecovery of Cu–Zn–Ni from computer printed circuit boards. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 120 (2) 2015, 167-173, <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2014.12.013>.
- SCHWEABE, W. K. et al. **Pilhas e baterias portáteis: legislação, processos de reciclagem e perspectivas**. [s.l: s.n.].

- Tudo o que você precisa saber sobre o lixo eletrônico. **Green Eletro**. 28 de julho de 2020. Disponível em: < <https://greeneletron.org.br/blog/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-lixo-eletronico/>>. Acesso em: 20 de novembro de 2024.
- VERA, M.; SCHIPPERS, A.; SAND, W. **Progress in bioleaching: Fundamentals and mechanisms of bacterial metal sulfide oxidation-part A. Applied Microbiology and Biotechnology** Springer Verlag, , 1 set. 2013.
- VUKOVIĆ, M.; ŠTRBAC, N.; SOKIĆ, M. Leaching in acidic solutions as a part of hydrometallurgical recycling of copper from printed circuit boards (PCBs). **Tehnika**, v. 74, n. 6, p. 813–819, 2019.
- WATLING, H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides - A review. **Hydrometallurgy**, v. 84, n. 1–2, p. 81–108, out. 2006a.
- WATLING, H. R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides - A review. **Hydrometallurgy**, v. 84, n. 1–2, p. 81–108, out. 2006b.
- YAMANE, L. H.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Biolixiviação de cobre de sucata eletrônica. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 3, p. 327–333, set. 2011.
- YOUNG, KWO. **Nickel Metal Hydride Batteries**. [s.l.] Mdpi AG, 2016. v. 1
- ZHAO, T. et al. An overview on the life cycle of lithium iron phosphate: synthesis, modification, application, and recycling. **Chemical Engineering Journal**. Elsevier B.V., , 1 abr. 2024.
- ZHENG, X. et al. Remediation of heavy metals polluted soil environment: A critical review on biological approaches. **Ecotoxicology and Environmental Safety**. 284 (2024) 116883. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116883>