



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU*
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO DE
PROCESSOS AMBIENTAIS

MARCELLY FIGUEIREDO ALVES

POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE BACTÉRIAS NA
SOLUBILIZAÇÃO E ADSORÇÃO DO COBRE EM DESCARTE
ELETROELETRÔNICO (PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO)

Recife, 02 de Agosto de 2023

MARCELLY FIGUEIREDO ALVES

**POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE BACTÉRIAS NA
SOLUBILIZAÇÃO E ADSORÇÃO DO COBRE EM DESCARTE
ELETROELETRÔNICO (PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO)**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco, como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Ambientais

Linha de Pesquisa: Biotecnologia e Meio Ambiente

Orientadora: Profa. Dra. Rosileide Fontenele da Silva Andrade
Coorientadora: Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki

Recife, 02 de Agosto de 2023

A474p Alves, Marcelly Figueiredo
Potencial biotecnológico de bactérias na solubilização e
adsorção do cobre em descarte eletroeletrônico (placas de
circuito impresso) / Marcelly Figueiredo Alves, 2023.
53 f. : il.

Orientador: Rosileide Fontenele da Silva Andrade.
Coorientador: Galba Maria de Campos Takaki.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de
Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento
de Processos Ambientais. Mestrado em Desenvolvimento de
Processos Ambientais, 2023.

1. Lixo eletrônico - Reaproveitamento. 2. Biotecnologia.
3. Cobre. 4. Lixiviação bacteriana. I. Título.

CDU 574.6

Pollyanna Alves - CRB4/1002

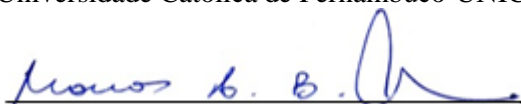
POTENCIAL BIOTECNOLÓGICO DE BACTÉRIAS NA SOLUBILIZAÇÃO E ADSORÇÃO DO COBRE EM DESCARTE ELETROELETRÔNICO (PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO)

MARCELLY FIGUEIREDO ALVES

Examinadores:



Profa. Dra. Rosileide Fontenele da Silva Andrade (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco-UNICAP



Prof. Dr. Marcos Antônio Barbosa de Lima
Universidade Católica de Pernambuco-UNICAP



Profa. Dra. Thayza Christina Montenegro Stamford
Universidade Federal de Pernambuco -UFPE

Defendida em: 02 de Agosto de 2023
Coordenador: Sergio Mendonça de Almeida

Dedico este trabalho primeiramente a Deus. Sem Ele, nada seria possível. A minha família por todo apoio para a realização do meu Mestrado. As minhas orientadoras Galba Maria de Campos Takaki e Rosileide Fontenele da Silva Andrade, por acreditarem no meu potencial, por me incentivarem a entrar no Programa do Mestrado. Aos meus amigos, por todo o apoio durante o Programa de Pós-graduação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela sabedoria, saúde, forças e discernimento concedido.

Ao meu esposo, Ricardo Lima Chen, por todo incentivo e ajuda por todo o curso.

Aos meus pais, Hidia Figueiredo da Silva e Marcelo Marques Alves e irmão, Marcelo Marques Alves Filho, por toda dedicação, esforço e incentivo durante o curso.

Agradeço a minha orientadora Profa. Dra. Rosileide Fontenele da Silva Andrade, pelos ensinamentos e aprendizados durante essa trajetória.

Agradeço a minha co-orientadora Profa. Dra. Galba Maria de Campos Takaki, pela oportunidade, sabedoria, paciência, ajuda, confiança com os experimentos. E por todos os nossos trabalhos realizados no Núcleo de Pesquisas em Ciências Ambientais e Biotecnologia (NPCIAMB) - UNICAP.

Aos meus colegas do Curso de Pós-graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais (UNICAP), pelo companheirismo e apoio, em especial, Gleice Paula de Araujo e Bruna Gabryella Andrade de Lima Silva, pela força, ajuda, parceria e por sempre me apoiar.

Aos meus amigos do NPCIAMB – UNICAP, pelo apoio e companheirismo, em especial, Dra. Adriana Ferreira Souza, pela sabedoria, ensinamentos, força, auxílio e incentivo, durante o curso.

Ao Reitor da Universidade Católica de Pernambuco, Prof. Dr. Pe. Pedro Rubem de Ferreira, por disponibilizar o acesso aos laboratórios do NPCIAMB, e pelo uso para a realização dos experimentos.

Aos órgãos de fomento à pesquisa FACEPE, CNPq e CAPES pelo suporte financeiro e apoio com bolsas para formação acadêmica e científica. Agradeço a todos que, diretamente e indiretamente, me ajudaram durante o curso.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
SUMÁRIO	vii
LISTA DE TABELAS	8
ABSTRACT	10
CAPÍTULO I	11
1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO DA LITERATURA	15
REFERÊNCIAS	25
CAPÍTULO II	27
1. INTRODUÇÃO	29
2. MATERIAL E MÉTODOS	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
CONCLUSÃO	35
REFERÊNCIAS	36
CAPÍTULO III	38
→ Campo Técnico	4
→ Problemas do Estado da Técnica	7
→ Objetivo da invenção	8
→ Vantagens da Invenção	8
→ Descrição Geral da Invenção	9
→ Descrição Detalhada da Invenção	9
CAPÍTULO IV	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Descarte de Resíduos eletroeletrônicos (A), contaminação de rios e lagos com metais pesados (B).	15
Figura 2 - Os maiores geradores de e-lixo, volume em milhões de toneladas/ano	16
Figura 3 - Ciclo de contaminação dos metais	18
Figura 4 - Exemplos de resíduos eletroeletrônicos	18
Figura 5 - Economia circular e reciclagem de eletrônicos	19
Figura 6 - Micro-organismos que são capazes de sobreviver em processos de biolixiviação, <i>Acidithiobacillus thiooxidans</i> (A), <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i> (B).....	22
Figura 7 - Remoção da máscara de solda das placas de circuito impresso utilizando a lixadeira orbital de palma (A, B, C) e separação dos terminais de contato entre memória RAM e a placa mãe (D).	30
Figura 8 - Aclimatação de <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Geobacillus stearothermophilus</i> e <i>Pseudomonas fluorescens</i> em diferentes concentrações de cobre presente nos PCIs	33
Figura 9 - Características da superfície da PCI após o processo de biolixiviação visualizadas na lente de 10kx34	
Figura 10 - Análise por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da biomassa: (A) <i>acillus subtilis</i> , (B) <i>Pseudomonas fluorescens</i> e (C) <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Impactos ambientais causados por metais encontrados em resíduos eletroeletrônicos	17
Tabela 2 - Composição do Meio T&K para processo de biolixiviação de placas de REEE por bactérias	32
Tabela 3 - Avaliação da condutividade elétrica após biolixiviação dos metais presentes nas Placas de circuito impresso (PCIs) por <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Pseudomonas fluorescens</i> e <i>Geobacillus stearothermophilus</i>	34

RESUMO

A recuperação dos Resíduos eletroeletrônicos (REEs) esta interligada a décima quinta meta dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) que visa recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres. Um dos principais componentes dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos é a placa de circuito impresso (PCIs)- (Placa Mãe) que possui em sua composição metais valiosos que podem ser recuperados incluindo o cobre. Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi investigar o potencial de biolixiviação das bactérias na recuperação de cobre em descarte de Placas de Circuito Impressa (PCIs). Para tanto, foram empregadas quatro bactérias (*Bacillus subtilis* UCP 1594, *Pseudomonas fluorescens* UCP 1514, *Geobacillus stearothermophilus* UCP 1520 e *Pantoea agglomerans* UCP 1581). Inicialmente, foi realizada aclimatação das bactérias em PCIs trituradas em pequenas partículase após foram transferidas para meio AN (ágar nutriente) adicionado de 0,02g, 0,08g e 0,1g.L das PCIs trituradas. Em seguida, as bactérias aclimatizadas foram submetidas ao processo de biolixiviação. O processo de biolixiviação ocorreu em meio T&K adicionado de uma PCI de 2 cm, além do inóculo de 10% (10^7 UFC/mL). O processo ocorreu sob agitação orbital de 180rpm, durante 15 dias e 37°C. A identificação do potencial das bactérias na remoção do cobre das PCIs foi avaliado através da condutividade elétrica, absorção atômica, Microscopia Eletrônica de Varredura-(MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva-(EDS). De acordo com resultados obtidos, todas as bactérias cresceram em meio sólido na máxima concentração de PCIs testada (0,1g/L) com número de colônias incontáveis. Além disso, a concentração máxima (18,98 S/m, 17,58 S/m, 17,31 S/m e 17,98 S/m) de eletrólitos na solução biolixiviada ocorreu após 15 dias de cultivo de *Pseudomonas fluorescens*, *Geobacillus stearothermophilus*, *Bacillus subtilis* e *Pantoea agglomerans*, respectivamente. Em adição, a partir dos resultados da microscopia eletrônica de varredura- MEV foi possível evidenciar a formação de pits de corrosão por todas as cepas estudadas. A bactéria *Geobacillus stearothermophilus* mostrou ser promissora para extração de cobre de REEs com potencial econômico de estimular o reaproveitamento e a reinserção do cobre metálico na cadeia produtiva contribuindo com a economia circular, a sustentabilidade e a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos. A *Pantoea agglomerans* foi capaz de promover o biotratamento do cobre metálico, seguido de adsorção de 37,12% do cobre pela biomassa após 15 dias de processo de biolixiviação. Portanto, o bioprocessos se tornou uma patente pois apresenta grande potencial econômico e inovador e propõe o pedido para a invenção tecnológica de reaproveitamento e reinserção do cobre metálico na cadeia produtiva.

Palavras-chave: Resíduos eletroeletrônicos; Potencial bacteriano; Remoção de cobre; Biotecnologia.

ABSTRACT

The recovery of electronic waste (WEEE) is linked to the fifteenth goal of the sustainable development goals (SDG) which aims to recover and promote the sustainable use of terrestrial ecosystems. One of the main components of waste electrical and electronic equipment is the printed circuit board (PCB)-(Motherboard) which has valuable metals in its composition that can be recovered including copper. In this context, the aim of the present study was to investigate the bioleaching potential of bacteria in the recovery of copper in disposal of Printed Circuit Boards (PCBs). For that, four bacteria were used (*Bacillus subtilis* UCP 1594, *Pseudomonas fluorescens* UCP 1514, *Geobacillus stearothermophilus* UCP 1520 and *Pantoea agglomerans* UCP 1581). Initially, bacteria were acclimatized in PCBs ground into small particles and then transferred to AN medium (nutrient agar) with 0.02g, 0.08g and 0.1g/L of PCBs ground. Then, the acclimatized bacteria were submitted to the bioleaching process. The bioleaching process took place in T&K medium added to a 2 cm PCI, in addition to the 10% inoculum (107CFU/mL). The process took place under orbital stirring at 180rpm for 15 days at 37°C. The identification of the potential of bacteria in removing copper from PCBs was evaluated through electrical conductivity, atomic absorption, Scanning Electron Microscopy-(SEM) and Energy Dispersive Spectroscopy-(EDS). According to the results obtained, all bacteria grew in solid medium at the maximum concentration of PCIs tested (0.1g/L) with countless colonies. Furthermore, the maximum concentration (18.98 S/m, 17.58 S/m, 17.31 S/m and 17.98 S/m) of electrolytes in the bioleached solution occurred after 15 days of cultivation of *Pseudomonas fluorescens*, *Geobacillus stearothermophilus*, *Bacillus subtilis* and *Pantoea agglomerans*, respectively. In addition, from the results of the scanning electron microscopy - SEM it was possible to evidence the formation of corrosion pits by all strains studied. The bacterium *Geobacillus stearothermophilus* proved to be promising for extracting copper from WEEE with economic potential to stimulate the reuse and reinsertion of metallic copper in the production chain, contributing to the circular economy, sustainability and recycling of electronic waste. *Pantoea agglomerans* was able to promote the biotreatment of metallic copper, followed by the adsorption of 37.12% of copper by the biomass after 15 days of bioleaching process. Therefore, the bioprocess became a patent because it presents great economic and innovative potential and proposes the application for the technological invention of reuse and reinsertion of metallic copper in the production chain.

Keywords: Electronic waste; Bacterial potential; Copper removal; Biotechnology.

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos eletroeletrônicos são considerados como aqueles aparelhos/materiais que são dados por ultrapassados, sem qualquer utilidade, passando a ser supérfluos e/ou sem valor, gerado pela intensa atividade humana. E estes estão aumentando cada vez mais, devido aos avanços tecnológicos, a lei da oferta e da procura, pela competitividade capitalista, pelo consumo elevado e o ritmo rápido da inovação tecnológica dos equipamentos eletrônicos, os quais são transformados em resíduos numa velocidade assustadora. A utilização inconsciente e/ou incorreta da tecnologia pode gerar várias consequências, sendo uma delas, a poluição eletrônica que, com seus componentes químicos causam poluição no meio ambiente e danos à saúde. (DE BESSA FERREIRA, 2008; RAJESH, 2022).

Ao serem encaminhados para os grandes lixões a céu aberto, os resíduos eletroeletrônicos podem causar danos à saúde, tanto à espécie animal quanto humana. Essas contaminações por esses resíduos podem ser por contato direto na manipulação das placas eletrônicas e seus componentes, bem como pode ocorrer de forma acidental com aparelhos que vão para o aterro sanitário, existindo assim, uma grande possibilidade de que os componentes tóxicos contaminem o solo chegando aos lençóis freáticos e conseqüentemente, afetando a água. E ainda, as contínuas emissões das partículas de metais pesados podem ser absorvidas por vegetais e animais, causando intoxicações em todos os níveis da cadeia alimentar, caracterizando como poluentes ambientais significativos, devido a toxicidade, sendo um problema de importância crescente gerando grande impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente (GIESE et al., 2021).

O processamento biológico surge como uma alternativa em comparação aos processos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos, que, demandam elevado consumo de energia e operação, além da geração de resíduos secundários produzidos durante o processamento dos REEE. Além disso, o uso de técnicas primitivas de reciclagem como lixiviação ácida e queima de cabos para recuperar ouro, cobre, e outros metais valiosos, são metodologias inadequadas que expõem diretamente a contaminantes perigosos provenientes desses processos. Como alternativa para a solução do problema, além do descarte adequado do resíduo, existe também a possibilidade de reaproveitar e tornar a ser útil novamente empregando a biohidrometalurgia (GIESE et al., 2018).

O desenvolvimento de métodos alternativos para a recuperação de materiais, atendendo aos princípios da sustentabilidade, deve ser estimulada e pode ser atendida através da rota biohidrometalúrgica, que utiliza os micro-organismos para promover a solubilização dos metais de interesse econômico. O uso da técnica de lixiviação bacteriana tem como vantagens a economia dos insumos utilizados no processo, uma vez que a própria bactéria produz os insumos e a não utilização de reagentes tóxicos, o que facilita a manipulação nos processos (GIESE et al., 2018).

A biohidrometalurgia é o termo usado para descrever os processos biotecnológicos que envolvem as interações entre os micro-organismos e metais, ou entre os micro-organismos e minerais contendo metais. Esse processo fundamenta-se basicamente na utilização de micro-organismos que auxiliam na solubilização de metais através da oxidação de sulfetos metálicos e da regeneração de agentes lixiviantes como o íon férrico (HENNEBEL et al., 2015).

Para utilização da biolixiviação como rota alternativa na recuperação de metais de REEE, devem ser considerados alguns fatores, para determinar as condições adequadas para o processamento dos REEE como as propriedades e características do resíduo, tamanho da partícula e área superficial do substrato, adaptação dos micro-organismos, pH, temperatura, potencial de oxirredução entre outros (DODSON et al., 2012).

O uso de micro-organismos na lixiviação de metais tem se mostrado eficiente, econômico e ecologicamente amigável, a qual representa uma alternativa em processos ambientais. Micro-organismos como bactérias e fungos convertem compostos metalizados em suas formas solúveis em água e são biocatalizadores desses processos de lixiviação. Além disso, a partir da biolixiviação, é possível realizar a recuperação de metais de grande valor comercial de resíduos perdidos em processos físico-químicos (CHAERUN, et al 2017).

Neste sentido, investigações foram realizadas empregando processos de biolixiviação por via Microbiológica com bactérias Gram positivas e Gram negativas para remoção de cobre presente em descartes de material eletroeletrônico (computador), especificamente as PCIs (Placas de Circuito Impresso).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Investigar o potencial de biolixiviação das bactérias pela capacidade de solubilização e adsorção de cobre presente em PCIs (Placas de Circuito Impresso) de computadores obsoletos.

2.2 Específicos

- Investigar a influencia de concentrações crescentes dos metais (presentes nas PCIs trituradas) no crescimento das bacterias;
- Selecionar a bacteria com maior potencial de crescimento na presença dos metais das PCIs trituradas;
- Investigar a capacidade das bacterias em solubilizar o cobre das PCIs pelo processo de biolixiviação;
- Identificar o potencial das bacterias em realizar a bioadsorção do cobre das PCIs após biolixiviação;
- Realizar cinética da extração do cobre a partir da condutividade elétrica;
- Realizar análises quantitativa e qualitativa do cobre após biolixiviação;
- Investigar a presença do cobre no sobrenadante (extracelular) e na biomassa (Intracelular).

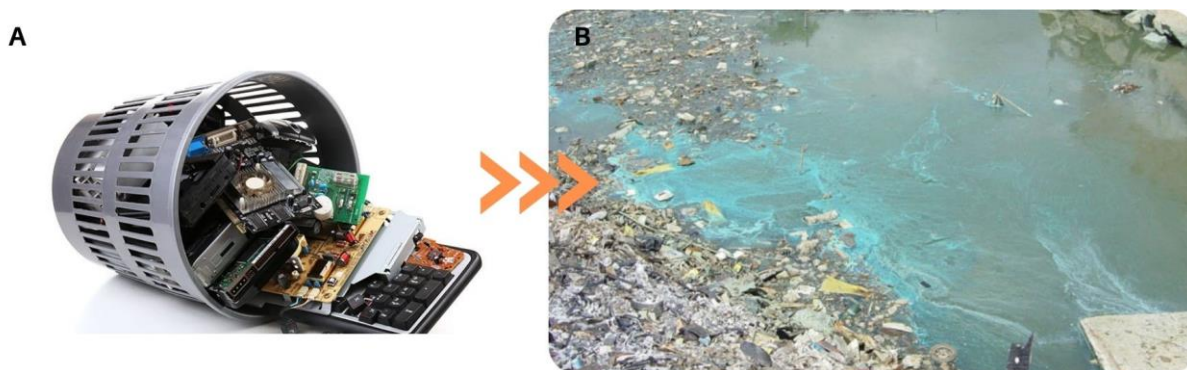
3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Problemática dos resíduos eletroeletrônicos (REEE)

Atualmente o meio ambiente sofre inúmeros impactos ambientais, dentre os quais, são aqueles causados pelo descarte incorreto de resíduos eletroeletrônicos, popularmente conhecidos como lixo eletrônico. Esse tipo de lixo é composto por equipamentos que utilizam corrente elétrica e são formados por circuitos eletrônicos, como os eletrodomésticos, equipamentos e componentes eletrônicos obsoletos (DE OLIVEIRA LIMA, 2015).

Devido ao aumento significativo na quantidade de equipamentos eletroeletrônicos produzidos e comercializados constantemente em decorrência da revolução tecnológica, os consumidores são incentivados a trocar de aparelhos continuamente. Assim, os equipamentos têm o seu ciclo de vida reduzido e rapidamente caem em desuso, causando um aumento na quantidade de resíduos descartados (SRICHANDAN et al., 2019). A obsolescência programada ou planejada, é uma técnica utilizada por fabricantes para forçar a compra de novos produtos e aumentar o consumismo, mesmo que os que você já tem, estejam em perfeitas condições de funcionamento, conseqüentemente, existe um acúmulo abusivo de resíduos que fortalecem o uso irracional dos recursos naturais, aumentando a concentração dos metais pesados, como cobre (Cu), zinco (Zn), e cobalto (Co), quando as concentrações desses elementos são alteradas pela deposição incorreta de diferentes resíduos no solo, podem ter efeitos deletérios sobre componentes bióticos e abióticos do ambiente (RAJESH, 2022).

Figura 1 - Descarte de Resíduos eletroeletrônicos (A), contaminação de rios e lagos com metais pesados (B).



Fonte: JORNAL JOCA <https://www.jornaljoca.com.br/brasil-produz-35-do-lixo-eletronico-da-america-latina/>

Um estudo conhecido como Iniciativa Step, um trabalho conjunto entre a ONU – Organização das Nações Unidas, empresas, governos e organizações não-governamentais (ONGs), foi o primeiro mapeamento global do chamado lixo eletrônico a mostrar o volume de resíduos eletroeletrônicos gerado em cada país. A produção de lixo eletrônico no mundo todo alcançou quase 49 milhões de toneladas métricas, sete quilos por cada habitante do planeta. Na Figura 1 são dados referentes à quantidade de resíduos descartados em 2016 (DE OLIVEIRA LIMA, 2015).

Figura 2 - Os maiores geradores de e-lixo, volume em milhões de toneladas/ano



Fonte: The Global E-waste Monitor 2020.

Segundo Kumar et al. (2017) um recorde de 53,6 milhões de toneladas de REEE foi gerado em todo o mundo em 2019, o que representa um aumento de 21% em apenas cinco anos, de acordo com o Global E-waste Monitor 2020 da Universidade das Nações Unidas. O Brasil foi o maior produtor de REEE da América Latina e o segundo de todoo continente americano, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. O relatório também prevê que os REEE globais totalizarão 74 milhões de toneladas em 2030, quase dobrando o volume gerado em apenas 16 anos. Em 2019, apenas 17,4% dos resíduos eletrônicos foram coletados e reciclados (GIESE et al., 2021). Isso significa que ouro (Au), prata (Ag), cobre (Cu), platina (Pt) e outros materiais recuperáveis de alto valor, avaliados em 57 bilhões de dólares, foram principalmente descartados ou queimados, em vez de coletados para reciclagem e recuperação de materiais valiosos (DOCKRELL, 2023).

O acúmulo e o descarte irregular dos resíduos, são preocupações que precisam ser consideradas quanto ao destino dos resíduos sólidos, pois equipamentos eletrônicos geram poluição do ecossistema e diminuição da biodiversidadedo solo, porque o chorume produzido nesses lixões atravessa o solo, contaminando-o e, como consequência, os reservatórios de água subterrâneos. A geração de resíduos eletroeletrônicos é três vezes maior do que a de lixo urbano (CIACA, 2015).

Além de substâncias valiosas, os equipamentos eletroeletrônicos podem conter diversas substâncias tóxicas, como por exemplo metais pesados (mercúrio, cádmio, chumbo e outros), aditivos retardadores de chama bromados (entreeles, pentabromofenol, éter difenil polibromado, tetrabromobisfenol) presentes em plásticos, como o policloreto de vinila (PVC) que é usado em revestimento isolante de fios e cabos além de outros elementos. Devido à presença desses compostos, o resíduo eletroeletrônico é comumente classificado como perigoso, apresentando riscos à saúdehumana e ao meio ambiente caso o seu gerenciamento não ocorra de forma adequada (GEISE, 2021).

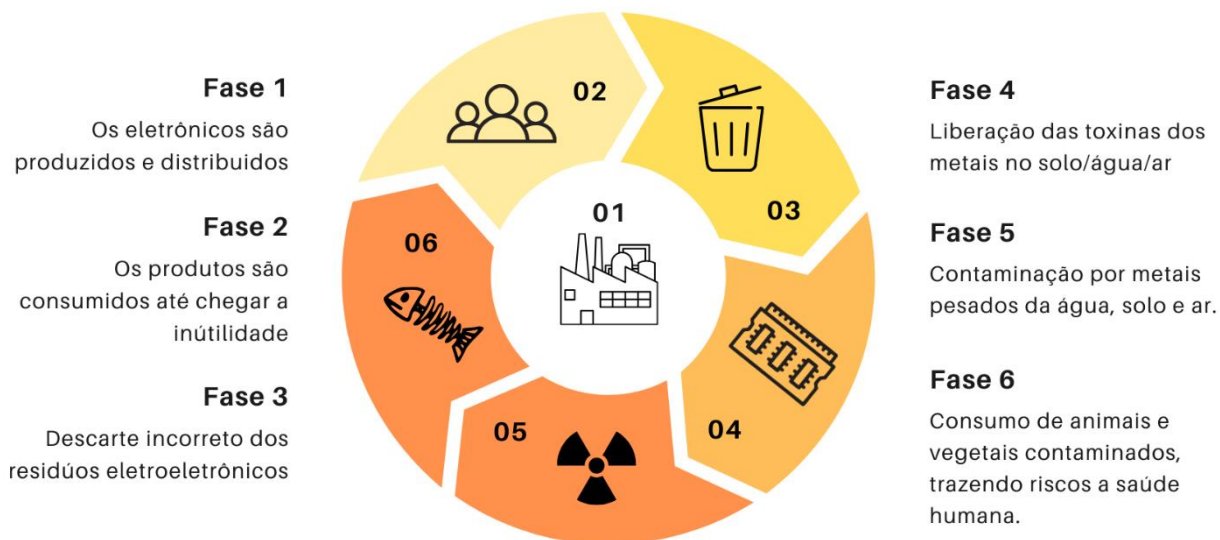
Tabela 1 - Impactos ambientais causados por metais encontrados em resíduos eletroeletrônicos

Metais Pesados	Onde é utilizado	Impactos ambientais	Impactos na saúde	Fonte
Cádmio	Computador e bateria de laptops	Contaminação da fauna e flora	Causa danos aos ossos, rins e pulmões	(GIESE, 2020)
Cobre	Computadores, celulares, tablets, smartphones e outros dispositivos	Redução da vida útil dos aterros sanitários.	Febre, náusea e diarreia	(GIESE, 2019)
Mercúrio	Computador, monitor, e TV tela plana	Poluição do ar	Causa danos cerebrais e ao fígado	(GU et al., 2018)
Berílio	Computador e Celular	Contaminação de solo, redução de vida útil de aterrossanitários	Causa câncer no pulmão	(PACHECO, 2018)
Ouro	Celulares, calculadoras, tablets, entre outros	Contaminação de rios e solos	Infeção das vias respiratórias superiores, dores abdominais, tosse, dores no peito	(CHAERUN, et al 2017)
Chumbo	Computador, celular, televisão		Causa danos ao sistema nervoso e sanguíneo	(HENNEBEL et al., 2015)

Os REEE são uma combinação de resíduos perigosos e não perigosos, que podem conter metais de alto valor agregado. Por esse motivo, caso não sejam reciclados ou reutilizados, precisam ser separados, transportados, tratados e descartados adequadamente. Durante muito tempo, grande parte dos REEE gerados em países em desenvolvimentos como o Brasil, foram dispostos de forma inadequada em aterros. No entanto, boa parte dos resíduos eletrônicos é considerado, atualmente, uma fonte rica em metais de alto valor agregado. Por este motivo, a coleta e o processamento de REEE visando a recuperação de metais sem o monitoramento adequado, têm sido cada vez mais frequentes (RAJESH, 2022).

Os resíduos dos eletrônicos, ao serem encaminhados para os grandes lixões a céu aberto, podem causar danos à saúde, tanto à espécie animal quanto humana. Essas contaminações destes resíduos podem ser por contato direto na manipulação das placas eletrônicas e seus componentes, como pode também ocorrer de forma acidental com aparelhos que vão para o aterro sanitário, existindo assim, uma grande possibilidade de que os componentes tóxicos contaminem o solo chegando aos lençóis freáticos e conseqüentemente, afetando a água (DOCKRELL, 2023).

Figura 3 - Ciclo de contaminação dos metais



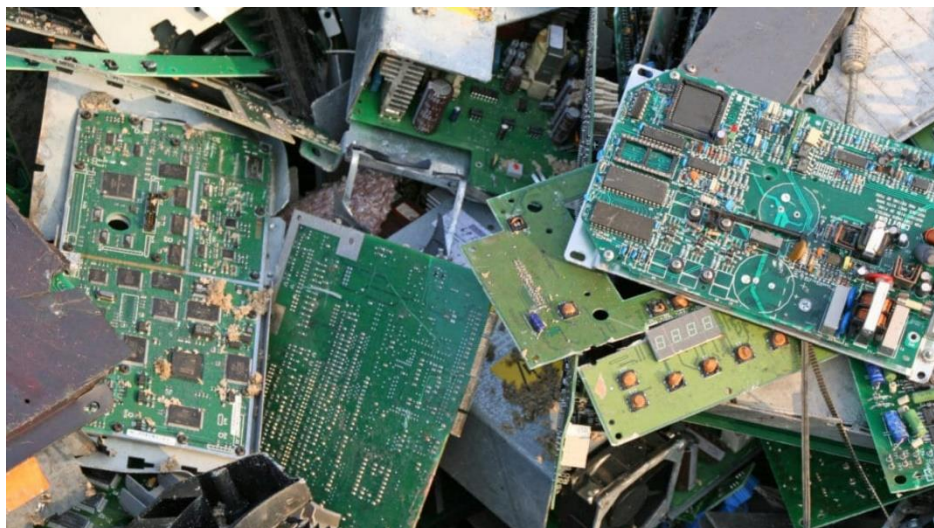
Fonte: a autora.

3.2 Tipos de resíduos eletroeletrônicos (REE)

São exemplos de aparelhos classificados como resíduos eletroeletrônicos: rádios, televisores, telefones celulares, pilhas e baterias, todos os equipamentos de informática, filmadoras, eletrodomésticos portáteis, brinquedos eletrônicos e lâmpadas fluorescentes. Os resíduos eletrônicos são considerados como aqueles aparelhos/materiais que são dados por inúteis, supérfluos e/ou sem valor, gerado pela atividade humana (DE BESSAFERREIRA, 2008). Computadores, smartphones, tablets, máquinas de lavar e chuveiros são exemplos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE) em que estão presentes Placas de Circuito Impresso (PCI), sendo essas, particularmente problemáticas para reciclar uma vez que são constituídas por uma mistura de materiais poliméricos, cerâmicos e metálicos. Utilizadas em grande parte dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE), as Placas de Circuito Impresso (PCI) apresentam em sua composição química, cerca de 16% de cobre, 4% de chumbo, 3% de ferro, 2% de níquel, 0,05% de prata e 0,03% de ouro. Além disso, apesar de divergências significativas em relação aos teores de alguns elementos, também é possível encontrar Elementos Terras Raras (ETR) em diversos tipos de PCI (RAJESH, 2022).

As placas eletrônicas ou placas de circuito impresso (PCIs) apresentam variações de composição e componentes, os

Figura 4 - Exemplos de resíduos eletroeletrônicos



materiais presentes nas PCIs podem ser categorizados em três grupos: orgânicos, metais e cerâmicos. Os materiais orgânicos são principalmente compostos de papéis e plásticos que dificultam a propagação de fogo. Nylon e poliuretano também são materiais orgânicos utilizados, porém em quantidades reduzidas. Já os metais que compõem as PCIs são: comuns, como o cobre (Cu), aço, alumínio (Al) e latão; raros, como o tântalo (Ta) e gálio (Ga); nobres como o ouro (Au), prata (Ag) e paládio (Pd); perigosos como o cromo (Cr), chumbo (Pb), berílio (Be), cádmio (Cd), zinco (Zn), mercúrio (Hg) e níquel (Ni). As cerâmicas presentes nas PCIs são basicamente a sílica e a alumina (DOCKRELL, 2023).

A composição das PCI é bastante heterogênea, variando de acordo com o tipo, a aplicação e o fabricante. Em geral, tem-se aproximadamente 28% de metais, 23% de materiais poliméricos e cerca de 49% de compostos cerâmicos. Segundo Santos (2012), as PCI correspondem a cerca de 2% do total de REEE e contêm a maior parte da fração metálica de alto valor agregado presente nesse tipo de resíduo. Vale ressaltar que, normalmente, a concentração dos metais presentes nas PCI é maior do que em minérios típicos, podendo chegar dez (10) vezes mais, no caso dos metais preciosos, tais como ouro e prata.

3.3. Reaproveitamento de resíduos eletroeletrônicos

A presença de metais preciosos torna as PCI uma fonte importante para a reciclagem de metais. No entanto, a diversidade de materiais presentes faz com que o processamento desse tipo de resíduo, visando a recuperação de metais, seja complexo. À vista disso, ainda são poucas as empresas tecnologicamente preparadas e ambientalmente capacitadas a operar no ramo da reciclagem de PCI no Brasil. O reaproveitamento gera ganhos econômicos, evita a contaminação pelo descarte incorreto e minimiza novos impactos ambientais da extração da matéria prima. Os efeitos dos metais pesados à saúde humana e ao meio ambiente tornam o reaproveitamento uma questão de saúde pública (GIESE, 2019).

A recuperação de recursos caros e escassos, como metais preciosos e materiais críticos desses produtos, representa, portanto, uma oportunidade econômica significativa. No entanto, as atuais tecnologias de reciclagem e modelos de negócio limitaram a nossa capacidade de recuperar esses recursos, pois, as taxas de recuperação permanecem relativamente baixas. Além disso, a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos é mais complexa do que a reciclagem dos resíduos sólidos domiciliares, por causa da alta concentração de compostos tóxicos predominantes nos aparelhos eletrônicos (Smol et al., 2016).

Figura 5 - Economia circular e reciclagem de eletrônicos



Fonte: Economia circular e reciclagem de eletrônicos <https://arvoreagua.org/economia-circular/economia-circular-e-reciclagem-de-eletronicos>

Algumas empresas, tais como a Nokia e a Siemens, têm tomado iniciativas importantes para minimizar o impacto do resíduo eletroeletrônico. A Nokia há mais de 2 anos desenvolve programas sócioambientais onde procura informar o consumidor do destino correto que deve dar à bateria do seu celular ao ser inutilizado. Suas baterias podem ser entregues em seus próprios postos de coletas. A empresa declara que após coleta, as baterias são enviadas para destinos corretos de aproveitamento de seus componentes. Por sua vez, a Siemens e a HP possuem sistemas de gestão ambiental focada no desenvolvimento sustentável e no reaproveitamento de seu próprio resíduo (COMPUTERWORLD, 2023).

Outras alternativas de minimização dos REEs são as empresas especializadas em seu reaproveitamento. Estas empresas são focadas na compra de materiais eletrônicos descartados principalmente por órgãos públicos e demais empresas, onde fazem os reparos necessários para que voltem a funcionar. Quando isto não é possível, desmontam e reaproveitam suas sucatas. Segundo dados da CEMPRE (2010), existem hoje no Brasil, 29 recicladoras de resíduos eletroeletrônicos no Brasil: 1 Rio Grande do Sul, 2 no Paraná, 4 em Santa Catarina e as demais em São Paulo, especializadas em materiais específicos como lâmpadas, produtos eletroeletrônicos (celulares, eletrodomésticos, impressoras, etc), pilhas e baterias (DOCKRELL, 2023).

3.4. Processos metalúrgicos para tratamento das placas de circuito impresso (PCI)

O tratamento das PCI é um processo complexo em função da heterogeneidade da sua composição e a etapa para iniciar a reciclagem das PCI é o pré-tratamento, nesse processo acontece a desmontagem dos equipamentos eletroeletrônicos obsoletos por meio do desmantelamento manual para a separação dos componentes, peças em geral e metais tóxicos (Silvas, 2014). Utilizam-se os processos mecânicos/físicos e ou processos metalúrgicos e a cominuição em moinhos de facas, martelos e rolos (fragmentação para a redução do tamanho e a liberação do material); classificação granulométrica (por intermédio de peneiras com aberturas diferentes para separação de frações em granulometrias específicas); separação magnética (separação dos materiais magnéticos é possível classificação em ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos); entre outros.

Após o tratamento das PCI's, tem-se o processamento metalúrgico que pode seguir rotas diferentes: pirometalúrgica, hidrometalúrgica ou o processo biológico que é a biohidrometalurgia. Estes processos têm como objetivo processar a sucata, a fim de recuperar os metais de interesse (MENDONZA, 2017).

3.4.1. Pirometalúrgia

A rota pirometalúrgica, é a forma mais arcaica de se produzir metais, emprega técnicas que utilizam elevadas temperaturas para o tratamento da sucata, no decorrer do aquecimento ocorrem reações de decomposição, de redução ou evaporação do composto. O grande problema do processo pirometalúrgico é que, com o refino do cobre blister para a obtenção de cobre eletrolítico, que é o material comercialmente puro, são emitidos na natureza gases que podem conter metais pesados como cádmio, arsênio, mercúrio, bismuto e chumbo (MENDES, 2010).

3.4.2. Hidrometalúrgia

A via hidrometalúrgica, é mais recente e se desenvolveu quando as propriedades ácidas e básicas se tornaram conhecidas, baseia-se na lixiviação ácida ou básica da sucata resultante da etapa de preparação, em que os metais de interesse são lixiviados do sólido para a solução aquosa. Na sequência, essa solução passa por etapas seletivas de purificação para recuperar os metais: extração por solventes, troca iônica, precipitação e cementação. Na extração por solventes, utiliza-se uma fase orgânica para retirar o metal de interesse da solução aquosa. A fase orgânica contendo o metal, posteriormente, passa por uma nova extração, nesta última o metal é transferido para uma solução aquosa isenta de outros metais (2 fases distintas). A troca iônica é análoga a anterior, todavia, a solução aquosa é colocada em contato com uma resina sólida que toma para si o metal e, logo após, em contato com uma solução aquosa distinta, o metal é retirado da resina. Os processos hidrometalúrgicos são mais complexos e tem um número maior de etapas comparado aos pirometalúrgicos, todavia, a via hidrometalúrgica apresenta vantagens em relação a via prirometalúrgica como: mais econômicos e eficientes, consomem menos energia, possui elevada seletividade, não emitem gases poluentes e os agentes lixiviantes e extratantes empregados, podem ser reutilizados várias vezes (MENDONZA, 2017).

3.5. Biohidrometalurgia

A descoberta de microorganismos, capazes de biolixiviar metais pesados, a partir da degradação de compostos associados, tem possibilitado o uso destes agentes biológicos como ferramenta de remoção ou biolixiviação de espécies metálicas contidas em matrizes sólidas ou semi-sólidas. O uso da tecnologia microbiana tem se mostrado como um processo alternativo na recuperação de metais dos REEE. A biohidrometalurgia é ecologicamente correta em comparação com a maioria dos processos existentes e também é considerada uma tecnologia verde por produzir uma menor quantidade de resíduos e demandar menos energia se comparada, por exemplo, a processos pirometalúrgicos (GU et al., 2018).

Na recuperação de metais, as duas principais áreas da biohidrometalurgia são a biolixiviação e a biossorção. A biossorção se aplica nas propriedades como tamanho e estruturas da superfície, que determinados micro-organismos vivos ou mortos, têm de interagir e concentrar íons de soluções metálicas (Dobson et al., 2007). A biomassa microbiana apresenta áreas superficiais específicas fornecendo sítios ativos com seletividade para sorção de íons metálicos. A combinação das técnicas de biossorção e biolixiviação é uma inovação que poderá auxiliar na interação dos micro-organismos, recuperando e concentrando de forma seletiva os elementos, sem a necessidade do uso de reagentes tóxicos ou processos que produzem resíduos (Giese et al., 2018)

3.5.1. Processo de Biolixiviação

Dentre os processos comumente empregados na recuperação de cobre a partir de diferentes tipos de resíduos, destacam-se os processos de biolixiviação. A biolixiviação é um processo comumente utilizado para a extração e a recuperação de metais a partir de minérios e resíduos. Os processos biotecnológicos aplicados na biometalurgia são derivados de ciclos metálicos biogeoquímicos naturais e reduzem a demanda de recursos, como minérios, energia e espaço de aterro para resíduos sólidos (UTIMURA, 2020).

A lixiviação bacteriana apresenta algumas vantagens, mesmo comparada aos processos hidrometalúrgicos, pois não requer gastos com insumos, que são produzidos pela própria bactéria. O gasto energético é reduzido, o investimento de capital e o custo operacional baixos, e a mão de obra especializada é igualmente reduzida, em relação aos demais processos de recuperação de metais. A característica principal da operação é o aproveitamento de rejeitos de minérios com teores reduzidos de metais (HENNEBEL et al., 2015). A biolixiviação pode ser aplicada também em tratamento de REEE para a recuperação de metais pois é considerada uma tecnologia de baixo custo de instalação e operação, além de baixo consumo energético (Tuncuk et al., 2012). Alguns fatores devem ser considerados para determinar as condições adequadas para o processamento dos REEE como as propriedades e características do resíduo, tamanho da partícula e área superficial do substrato, adaptação dos micro-organismos, pH, temperatura, potencial de oxirredução entre outros (Dodson et al., 2012).

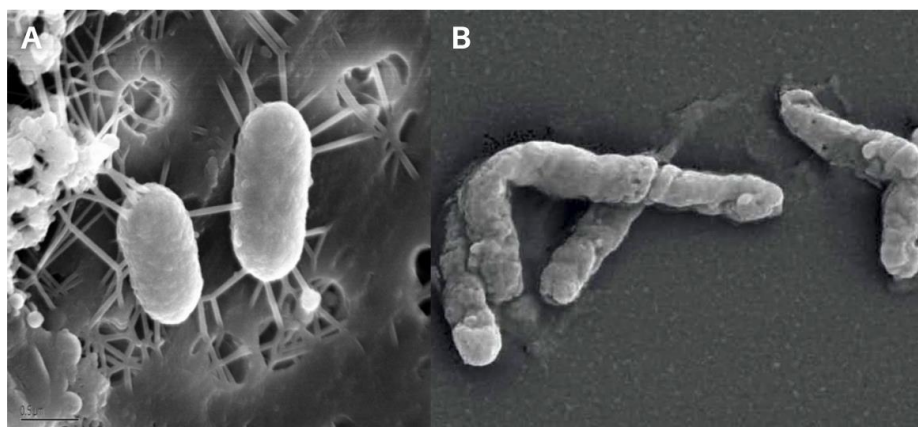
Os micro-organismos, além de expressarem genes de resistência à metais pesados que os permitem sobreviver em ambientes poluídos por metais pesados, também apresentam várias estratégias para neutralizar os efeitos tóxicos dos antibióticos (Salam, 2020). Além de metais e antibióticos micro-organismos codificam genes para neutralizarem compostos químicos.

3.5.2. Micro-organismos utilizados nos processos de biolixiviação

Inicialmente é necessária a seleção de organismos tolerantes ao cobre e a identificação de mecanismos de resistência. Isso é possível de ser obtido em áreas contaminadas que podem ter pré-selecionado organismos resistentes em função da exclusão exercida pela presença de cobre em concentrações tóxicas. Os micro-organismos acidófilos são capazes de crescer em ambiente ácido com uma variação do pH entre 1,5 e 4,5 sendo as espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*, as bactérias mesófilas mais frequentemente isoladas em ambientes de lixiviação. Os micro-organismos que realizam o processo podem ser classificados de acordo com a temperatura em que se desenvolvem como mesófilos (até 40°C) e termófilos moderados (40-55°C) e extremos (55-80°C) (DONATI et al., 2007).

Falando-se especificamente da *Acidithiobacillus ferrooxidans*, é sabido que ela tem resistência natural a uma gama de íons metálicos e cresce à temperatura ambiente, obtendo energia a partir da oxidação de compostos de enxofre e íons ferrosos a íons férricos, trabalhando bem na faixa de pHs entre 1,0-4,0 (RAJESH, 2022).

Figura 6 - Micro-organismos que são capazes de sobreviver em processos de biolixiviação, *Acidithiobacillus thiooxidans* (A), *Acidithiobacillus ferrooxidans* (B).



As bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans* são também conhecidas como *Thiobacillus ferrooxidans* e a característica desse tipo de bactérias é que crescem em temperatura ambiente entre 25 a 40°C, sendo assim consideradas como mesófilas com pH de crescimento na faixa de 1,8 a 2,5 (Schippers, 2007; Donati et al., 2007). As bactérias desse tipo são quimiolitotróficas, o que significa que possuem um metabolismo em que a energia necessária para a sobrevivência é obtida a partir da oxidação de compostos inorgânicos (RAJESH, 2022).

Em relação ao cobre, existe uma série de resultados que indicam o potencial do uso de micro-organismos para a remoção/imobilização deste metal pelos micro-organismos. Esta remoção pode ser realizada por diferentes micro-organismos como *Pseudomonas* sp, *Bacillus* sp, *Staphylococcus*, *Cândida*, *Saccharomyces*, *Kluyveromyces*, *Schizosaccharomyces* entre outros. Os micro-organismos podem ser resistentes até 6000 mg kg de cobre, como descrito por Umrana (2006), que absorveram 97,5% do cobre nesta concentração.

Alguns organismos podem ser grandes acumuladores de cobre dentro da célula, como no caso da *Pseudomonas syringae* que pode acumular cerca de 120 mg de cobre (12%) por grama de massa seca celular podendo ser uma alternativa de remoção do cobre do ambiente (ANDREAZZA, 2009). Quando estudado a sorção de cobre por bactérias da rizosfera de trigo, foram isoladas as bactérias *Bacillus* sp. e *Pseudomonas* sp., e foi demonstrado que o *Bacillus* adsorveu mais Cu(II) e Mn(II) do que a *Pseudomonas* em todas as concentrações estudadas desse metal. O maior tempo de exposição aos metais implicou em maior sorção de cobre pelos isolados (RAJESH, 2022). Essa grande gama de micro-organismos e condições para remoção do cobre, como pH, temperatura e concentração de cobre, torna eficiente a utilização de organismos resistentes para a biolixiviação de resíduos eletroeletrônicos.

3.6. Métodos qualitativos e quantitativos para determinar a biolixiviação

3.6.1. Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é a grandeza física que mede a capacidade inerente a algum material de transportar cargas elétricas quando sujeito a uma diferença de potencial elétrico. É uma característica bastante própria para materiais como o cobre. Quanto mais facilmente os elétrons fluem quando submetidos a um campo elétrico, maior é a condutividade do material. Dentro dos chamados efeitos elétricos, a condução de corrente por um determinado material condutor é um destes casos onde uma série de efeitos a nível atômico revelam-se através de uma grandeza macroscópica que é a resistência elétrica ou mais precisamente a condutividade dos materiais.

3.6.2. Análise de microcópia eletrônica de varredura (MEV)

O MEV é um tipo de microscopia em que um feixe de elétrons focalizado varre a superfície da amostra, interagindo com a matéria, gerando diferentes tipos de sinais que podem oferecer informações sobre a morfologia e composição química do material. O princípio de funcionamento do ensaio está relacionado com a interação entre os elétrons e a matéria. O microscópio Eletrônico de Varredura contém uma fonte geradora de um feixe de elétrons que é disparado continuamente na amostra durante o ensaio, realizando uma varredura em sua superfície. Assim, através de um detector

presente no equipamento, é possível analisar as energias dos elétrons durante a interação dos mesmos com a superfície, que são interpretadas pelo equipamento e geram imagens com alta definição. O MEV é um equipamento que utiliza um feixe de elétrons para explorar a superfície da amostra e, dessa forma, gerar imagens com conformação tridimensional e de alta resolução do material.

3.6.3. Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS) acoplado ao MEV

A Espectroscopia por Energia Dispersiva, que permite detectar elementos químicos na superfície da amostra. é acoplado ao MEV (microscopia eletrônica de varredura) um analisador de Raios X, para que as frequências da radiação liberadas no espectro do Raio x sejam analisadas. O princípio desse ensaio é baseado na análise dos fótons liberados pelos átomos da amostra quando o feixe de elétrons do equipamento se choca com a sua superfície. Isso é possível pois cada elemento químico libera fótons com frequências específicas. Os resultados são apresentados na forma de um espectro de energia versus intensidade relativa dos picos. O EDS permite a realização de uma avaliação química qualitativa e semiquantitativa, dado que sua análise se restringe à superfície da substância, não tendo precisão, assim, uma estimativa da concentração dos elementos presentes. Desse modo, um dos focos necessários para uma análise satisfatória é a topografia da amostra, sendo que quanto mais plano e polido for o material, melhor será o resultado semiquantitativo obtido (VIEIRA, 2021).

3.6.4. Absorção atômica

Para detectar metais ou metalóides em amostras ambientais como a água as técnicas mais utilizadas são a espectrofotometria de absorção atômica por chama e a espectrofotometria de absorção atômica por forno de grafite. A técnica da absorção atômica por chama e por grafite baseiam-se no princípio de que os metais no estado fundamental absorvem luz a comprimentos de onda específicos. Na chama, os íons metálicos numa solução são convertidos ao seu estado atômico pela chama. A luz nos comprimentos de onda apropriados é fornecida e a quantidade de luz absorvida é mensurável. Esta técnica requer uma amostra líquida que seja aspirada, aerossolizada e misturada com gases combustíveis. A mistura é inflamada pela chama a temperaturas de 2100-2800 °C. Durante a combustão os átomos do elemento a detectar são reduzidos ao seu estado fundamental, absorvendo de seguida luz a comprimentos de onda específicos para o elemento a detectar (JESUS, 2011).

REFERÊNCIAS

- ATUANYA, E. I.; OSEGHE, E. O. Lead contamination and microbial lead tolerance in soils at major road junctions in Benin City. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 10, n. 2, 2006.
- ANDREAZZA, Robson. Potencial do uso de bactérias e plantas para a remediação de cobre em áreas de vitivinicultura de rejeito de mineração de cobre no Rio Grande do Sul. 2009.
- BRANDL, H.; BOSSHARD, R.; WEGMANN, M. Computer-munching microbes: metal leaching from electronicscrap by bacteria and fungi. **Hydrometallurgy**, v. 59, n. 2-3, p. 319-326, 2001.
- CHAERUN, S. K.; SULISTYO, R. S.; MINWAL, W. P.; MUBAROK, M. Z. **Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger***. **Hydrometallurgy**, v. 174, p. 29-37, 2017.
- CHAUDHARY, N.; BANERJEE, T.; IBRAHIM, N.; SIBI, G. **Fungal leaching of iron ore: 425 isolation, characterization and bioleaching studies of *Penicillium verruculosum***. **American Journal Microbiology**, v.5, p.27-32, 2014.
- COMPUTERWORLD, 2004. Meio Ambiente – Lixo eletrônico vira montanha de problemas. Disponível em: http://www.viaseg.com.br/noticia/3288meio_ambiente_lixo_eletronico_vira_montanha_de_problemas.html. Acesso em 30 de jun de 2023.
- DE BESSA FERREIRA, Juliana Martins; FERREIRA, Antônio Claudio. **A sociedade da informação e o desafio dasucata eletrônica**. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 157-170, 2008.
- DE OLIVEIRA LIMA, Anna Flávia et al. Gestão de resíduos eletroeletrônicos e seus impactos na poluição ambiental. **Latin American Journal of Business Management**, v. 6, n. 2, 2015.
- DOCKRELL, Mark EC; PURCHASE, Diane; PRICE, Robert G. E-waste and metal contamination in the environment-Health effects. 2023.
- GIESE, E. C. Inovações tecnológicas na biomineração de minérios lateríticos de níquel e cobalto. **Tecnologia emMetalurgia Materiais e Mineração**, v. 16, n. 4, p. 558-566, 2019a.
- GIESE, E. C. **Os desafios da biometalurgia frente ao crescimento das minas urbanas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2020. Série Estudos e Documentos, 104. 41 p. 2020.
- GIESE, Ellen C.; BLANCO, José; LINS, Fernando A. F.; XAVIER, Lúcia H. S. M. **Mineração urbana e cooperativismo : uma abordagem sobre a reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro : CETEM/MCTI, 27 p, 2021.
- GU, T.; RASTEGAR, S.O.; MOUSAVI, S.M.; LI, M.; ZHOU, M. **Advances in bioleaching for recovery of metalsand bioremediation of fuel ash and sewage sludge**. **Bioresource Technology**, v. 261, p. 428- 440, 2018.
- HENNEBEL, T.; BOON, N.; MAES, S.; LENZ, M. **Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R & D priorities and future perspectives**. **New Biotechnology**, v. 32, p. 121- 127, 2015.

JESUS, João; SANTOS, Sara; RODRIGUES, Ana Lúcia. Metais pesados na água. **Revista Lusófona de Ciência e Medicina Veterinária**, v. 4, 2011.

Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: **An overview on generation, collection, legislation and recycling practices**. *Resources, Conservation and Recycling*, 122, 32–42. doi:10.1016/j.resconrec.2017.01.018, 2017.

MENDONÇA, Belmira Maria. Recuperação de metais pesados de baterias usadas de celulares por biolixiviação. 2017.

MENDES, Alana Feliciano; VIEIRA, F. Gestão ambiental na indústria de mineração no Brasil: Técnicas para minimizar potenciais impactos ambientais na extração do cobre. In: **I CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL**. 2010.

PACHECO, Genilson Jacinto; DE CAMPOS, Tácio Mauro Pereira; DE MATTOS NASCIMENTO, Daniel Luiz. Análise do sistema de gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos da Alemanha e suas influências na logística reversa do município do Rio de Janeiro. **Sistemas & Gestão**, v. 13, n. 4, p. 541-556, 2018.

RAJESH, Ramachandran; KANAKADHURGA, Dharmaraj; PRABAHARAN, Natarajan. Electronic waste: A critical assessment on the unimaginable growing pollutant, legislations and environmental impacts. **Environmental Challenges**, v. 7, p. 100507, 2022.

RODRIGUES, Éllen Francine et al. **Recovery of copper and gold from computer printed circuit boards by bioleaching with *Aspergillus niger***. 2020.

RIBEIRO NETO, Wilson Alves. **Biolixiviação de minério de cobre da mina de Sossego, PA - Companhia Vale do Rio Doce**. 2007. 54 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88037>>.

SRICHANDAN, H.; MOHAPATRAB, R. K.; PARHIB, P. K.; MISHRA, S. **Bioleaching approach for extraction of metal values from secondary solid wastes: A critical review**. *Hydrometallurgy*, v.189, p.105-122, 2019.

UTIMURA, Solange Kazue. **Uso da biolixiviação no processo de reciclagem de cobre proveniente dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)**. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-15012021-091227/pt-br.php>. Acesso em: 04 jan. 2023.

VANGASSE, Carlos Alberto Vanderlei. **O vórtice do lixo eletrônico no instituto federal de alagoas: Prolongamento do reaproveitamento de componentes eletrônicos**. 2020. 48 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Análise de Sistemas Ambientais) – Programa de Pós Graduação em Análise de Sistemas Ambientais, Centro Universitário CESMAC, Maceió-AL, 2020.

VIEIRA, Maria Eduarda Martins et al. Espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) acoplada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV): fundamentos e aplicações em produtos lácteos. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 10, p. e262101018622-e262101018622, 2021.

Yamane, Luciana Harue, Espinosa, Denise Croce Romano e Tenório, Jorge Alberto Soares: **Biolixiviação de cobre de sucata eletrônica**. Rem: *Revista Escola de Minas* [online]. 2011, v. 64, n. 3 [Acessado 16 Setembro 2021], pp. 327-333. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672011000300011>>. Epub 03 Out 2011.

CAPÍTULO II

PROSPECÇÃO BIOTECNOLÓGICA PARA RECUPERAÇÃO DO COBRE EM RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS (PLACA DE MEMÓRIA)

Aceito para publicação no e-book “**Connecting Expertise Multidisciplinary
Development for the Future**”

ISBN nº 978-65-84976-46-7 este e-book é editado pela Seven Publicações Ltda. CNPJ:
43.789.355/0001-14.

PROSPECÇÃO BIOTECNOLÓGICA PARA RECUPERAÇÃO DO COBRE EM RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS (PLACA DE MEMÓRIA)

Marcelly Figueiredo Alves

Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Processos Ambientais – UNICAP, 50050-900 Recife-Pe, Brasil

E-mail: marcelly.2021602055@unicap.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1229-0266>

Sidney Marlon Lopes de Lima

Professor do Departamento de Eletrônica e Sistemas
Universidade Federal de Pernambuco,

E-mail: sidney.lima@ufpe.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4350-9689>

Galba Maria Campos-Takaki

Professora Titular da Escola ICAM-TECH.

Coordenadora do Núcleo de Pesquisas em Ciências Ambientais e Biotecnologia Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, 50050-900 Recife-Pe, Brasil

E-mail: galba.takaki@unicap.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0519-0849>

Rosileide Fontenele da Silva Andrade

Professora da Escola de Saúde e Ciências da vida

Pesquisadora do Núcleo de Pesquisas em Ciências Ambientais e Biotecnologia Universidade Católica de Pernambuco – UNICAP, 50050-900 Recife-Pe, Brasil

E-mail: rosileide.andrade@unicap.br ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8526-554X>

*Autor correspondente:

RESUMO

A recuperação dos Resíduos eletroeletrônicos (REEs) esta interligada a décima quinta meta dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) que visa recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres. Um dos principais componentes dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos é a placa de circuito impresso (PCIs)- (Placa Mãe) que possui em sua composição metais valiosos que podem ser recuperados incluindo o cobre. Neste contexto, o objetivo do presente estudo foi investigar o potencial de biolixiviação das bactérias na recuperação de cobre em descarte de Placas de Circuito Impressa (PCIs). Para tanto, foram empregadas três bactérias (*Bacillus subtilis* UCP 1594, *Pseudomonas fluorescens* UCP 1514 e *Geobacillus stearothermophilus* UCP 1520). Inicialmente, foi realizada aclimação das bactérias em PCIs trituradas em pequenas partículas após foram transferidas para meio AN (água nutriente) adicionado de 0,02g, 0,08g e 0,1g.L das PCIs trituradas. Em seguida, as bactérias aclimatizadas foram submetidas ao processo de biolixiviação. O processo de biolixiviação ocorreu em meio T&K adicionado de uma PCI de 2 cm, além do inóculo de 10% (10^7 UFC/mL). O processo ocorreu sob agitação orbital de 180rpm, durante 15 dias e 37°C. A identificação do potencial das bactérias na remoção do cobre das PCIs foi avaliada através da condutividade elétrica, absorção atômica, Microscopia Eletrônica de Varredura-(MEV) e Espectroscopia por Energia Dispersiva-

(EDS). De acordo com resultados obtidos, todas as bactérias cresceram em meio sólido na máxima concentração de PCIs testada (0,1 g/L) com número de colônias incontáveis. Além disso, a concentração máxima (18,98 S/m, 17,58 S/m e 17,31 S/m,) de eletrólitos na solução biolixiviada ocorreu após 15 dias de cultivo de *Pseudomonas fluorescens*, *Geobacillus stearothermophilus* e *Bacillus subtilis*, respectivamente. A bactéria com maior potencial de extrair cobre das PCIs foi o *Geobacillus stearothermophilus* com recuperação de 13,9% do cobre adsorvido na biomassa. Em adição, a partir dos resultados da microscopia eletrônica de varredura- MEV foi possível evidenciar a formação de pits de corrosão por todas as cepas estudadas. Portanto, a bactéria *Geobacillus stearothermophilus* mostrou ser promissora para extração de cobre de REEes com potencial econômico de estimular o reaproveitamento e a reinserção do cobre metálico na cadeia produtiva contribuindo com a economia circular, a sustentabilidade e a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos.

Palavras-chaves: Bactérias; Biolixiviação; Metais; Placa-mãe; Resíduo eletrônico

1. INTRODUÇÃO

Os resíduos eletroeletrônicos correspondem a maior parte do total de resíduos produzidos e possuem a maior taxa de crescimento por ano, estimada em 3% a 5%, representando cerca de 20 a 50 milhões de toneladas descartadas (ZHAO, 2023).

A utilização inconsciente ou incorreta da tecnologia pode gerar várias consequências, sendo uma delas, a poluição eletrônica que, com seus componentes químicos causa poluição no meio ambiente e danos à saúde. Com o crescimento das vendas de eletrônicos e a rápida evolução tecnológica surgem dois problemas: primeiro, um problema ambiental, pois os eletrônicos são constituídos de metais pesados que são descartados no meio ambiente; segundo, falta de matéria prima, pois com a produção de eletrônicos em voga necessita-se de mais matéria prima (FERREIRA; DA SILVA; GALDINO, 2010).

O procedimento para reciclagem dos resíduos se inicia com a coleta e triagem dos equipamentos, quando se separam os que possuem condições de uso daqueles que não poderão ser reutilizados. A reciclagem das PCIs ainda é limitada devido à heterogeneidade dos materiais constituintes e à complexidade de sua produção. Por isso, o estudo a reciclagem desses materiais por processamento mecânico, térmico e químico ou a combinação destes estão em andamento (CALGARO et al., 2014).

As contínuas emissões das partículas de metais pesados podem ser absorvidas por vegetais e animais, causando intoxicações em todos os níveis da cadeia alimentar, caracterizando como poluentes ambientais significativos, devido a sua toxicidade, sendo um problema de importância crescente gerando grandes impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente (GIESE et al., 2021).

A biohidrometalurgia é o termo usado para descrever os processos biotecnológicos que envolvem as interações entre os micro-organismos para recuperação de metais valiosos. A biolixiviação é um método ligado à biohidrometalurgia para recuperação de metais em REEE. Este método possui vantagens como estimular por tratamento biológico a rápida extração dos metais valiosos, como o cobre, presentes nas placas de circuito impresso inutilizadas e ao mesmo tempo contribuir com a economia circular de forma segura, eficiente e em conformidade com padrões de

sustentabilidade (HENNEBEL et al., 2015).

O cobre é encontrado na natureza na forma de minerais (como a calcopirita, calcocita, covelita, azurita, malaquita, etc). E por estar o cobre na forma de minerais, são necessários processamentos metalúrgicos para a obtenção do cobre metálico extraído desses minerais. Devido a ductibilidade, maleabilidade e boa condutividade elétrica o cobre é um metal largamente utilizado na fabricação de fios, cabos e ligas metálicas (AZEVEDO E CHASIN, 2013).

Portanto, o objetivo do trabalho foi aplicar tratamento biológico sustentável utilizando bactérias para recuperação do cobre presente nas placas de circuito impresso (PCIs) dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE).

2. MATERIAL E MÉTODOS

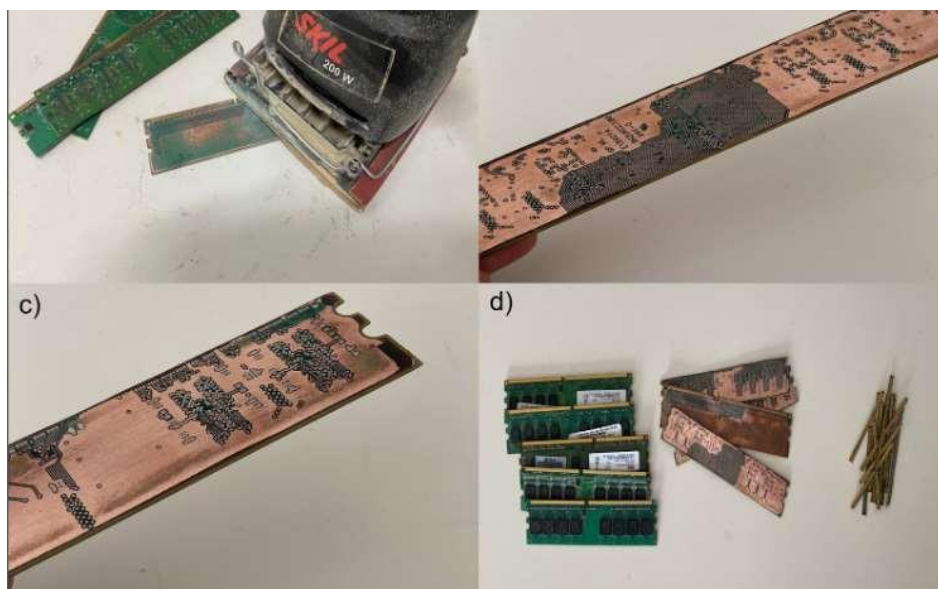
2.1. Coleta e desmonte das placas de circuito impresso

As Placas de Circuito Impresso (PCI) foram adquiridas de computadores inutilizados no departamento de Engenharia Eletrônica e Sistemas da UFPE (Universidade Federal de Pernambuco). Os componentes eletrônicos presentes nas Placas de Circuito Impresso, capacitores e resistores, foram retirados manualmente por desentorse com auxílio de pinças e alicates para remoção total. Todo o desmonte foi realizado em bancada com uso de equipamentos de proteção individual- EPI's.

2.2. Remoção da máscara de solda das PCIs

A primeira etapa para remover a máscara de solda presente nas (placas de circuito impresso), há o emprego do processo mecânico através de lixadeira orbital de palma conforme exibe a (Fig 2A). Opta-se por lixar a máscara de solda do nível mais externo, permanecendo a máscara nos níveis mais internos (mais fundos) como demonstra a Fig. 2B e Fig 2C. Ainda quanto aos procedimentos mecânicos, os terminais de contato entre a memória RAM e a placa mãe são separados (cortados) do restante da placa como exibe a Fig 2D. Em seguida, foi aplicado método físico- químico imergindo as PCIs em Soda Cáustica a 60°C sob agitação durante a min até a remoção completa da máscara de solda.

Figura 7 - Remoção da máscara de solda das placas de circuito impresso utilizando a lixadeira orbital de palma (A, B, C) e separação dos terminais de contato entre memória RAM e a placa mãe (D).



2.3. Padronização do tamanho da placa e esterilização

As placas de circuito desmontadas tiveram, inicialmente, suas dimensões reduzidas em guilhotina manual. Uma parte deste material foi reduzido para aproximadamente o tamanho de 2cm², enquanto a outra parte foi triturada até a obtenção do tamanho de partícula de 250µm (mesh nº60). Após a redução, as placas passaram pelo processo de esterilização, onde ficaram pelo período de 24h submersas em álcool 70%. Após esse período foram expostas a luz UV durante 30min.

2.4. Micro-organismos

As bactérias utilizadas no processo foram *Bacillus subtilis* UCP 1594, *Pseudomonas fluorescens* UCP 1514 e *Geobacillus stearothermophilus* UCP 1520 isolados das águas do Rio Formoso no estado de Pernambuco (Brasil), cedidas pela Coleção de Culturas UCP - Universidade Católica de Pernambuco, localizado no Núcleo de Pesquisas em Ciências Ambientais e Biotecnologia (NPCIAMB), da UNICAP, Recife, Pernambuco, Brasil.

2.5. Aclimação das bactérias

O meio de cultura empregado para aclimação das bactérias foi o meio Ágar Nutriente (1 g/L de extrato de carne, 5 g/L de peptona, 2 g/L de extrato de levedura, 5 g/L de cloreto de sódio e 15 g/L de ágar) adicionado de diferentes concentrações das placas de circuito impresso trituradas (0,02, 0,08 e 0,1g/L). As condições de crescimento foram temperatura de 37°C incubadas durante 24h.

2.6. Inóculo

As bactérias foram crescidas no meio Caldo Nutriente (CN) constituído por extrato de carne 1,0g/L, extrato de Levedura 2,0g/L, peptona 5,0g/L e cloreto de Sódio 5,0g/L durante 24h a temperatura de 37°C. Em seguida, alíquotas do cultivo, de cada bactéria, foram retiradas para análise do crescimento microbiano por densidade óptica (Espectrofotometria a 600nm) até a obtenção de 10⁷cel/mL.

2.7. Processo de biolixiviação

Inicialmente, o meio de cultivo T&K foi preparado a partir das soluções tampão (A e B). O tampão A possui a seguinte composição: 0,625 g/L (NH₄)₂SO₄, 0,625 g/L K₂HPO₄, 0,625 g/L MgSO₄.7H₂O. Em seguida, a solução B foi preparada (166,5 g/L FeSO₄.7H₂O). Os pH das soluções foram ajustado para 7. A solução B foi esterilizada por filtração em Millipore (0,22 µm) e a solução A foi esterilizada em autoclave a 121 °C. Em seguida, as duas soluções (A e B) na proporção de 4:1 foram unidas em frascos de Erlenmeyer de 250 mL contendo 72 mL de solução (72 mL da solução A e 18mL da solução B) para obtenção do meio T&K. A este meio (T&K) foi adicionado uma placa de circuito impresso no tamanho de 2cm². O ensaio de biolixiviação iniciou após adição do inóculo bacteriano (10 % v/v) durante 15 dias, temperatura de 37°C e 180 rpm. Para o controle foi adicionado ao meio T&K uma placa de circuito impresso no tamanho de 2cm², porém sem a presença do inóculo bacteriano.

Tabela 2 - Composição do Meio T&K para processo de biolixiviação de placas de REEE por bactérias

SOLUÇÃO A	CONCENTRAÇÃO (g L⁻¹)
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,625
K ² HPO ₄	0,625
MgSO ₄ .7H ₂ O	0,625
SOLUÇÃO B	CONCENTRAÇÃO (g L⁻¹)
FeSO ₄ .7H ₂ O	166,5

2.8. Separação do sobrenadante da biomassa

Após o processo de biolixiviação foi realizada a separação do sobrenadante da biomassa para identificar a possível presença do cobre. Para tanto, o sobrenadante foi transferido para tubos de Falcon para centrifugação a 8000 rpm por 20 min a 10°C.

2.9. Determinação do pH final

Para confirmação da constância do pH, durante todo o processo, alíquotas foram retiradas para avaliação do pH com o auxílio do medidor de pH METTLER TOLEDO.

2.10. Determinação da MEV-EDS

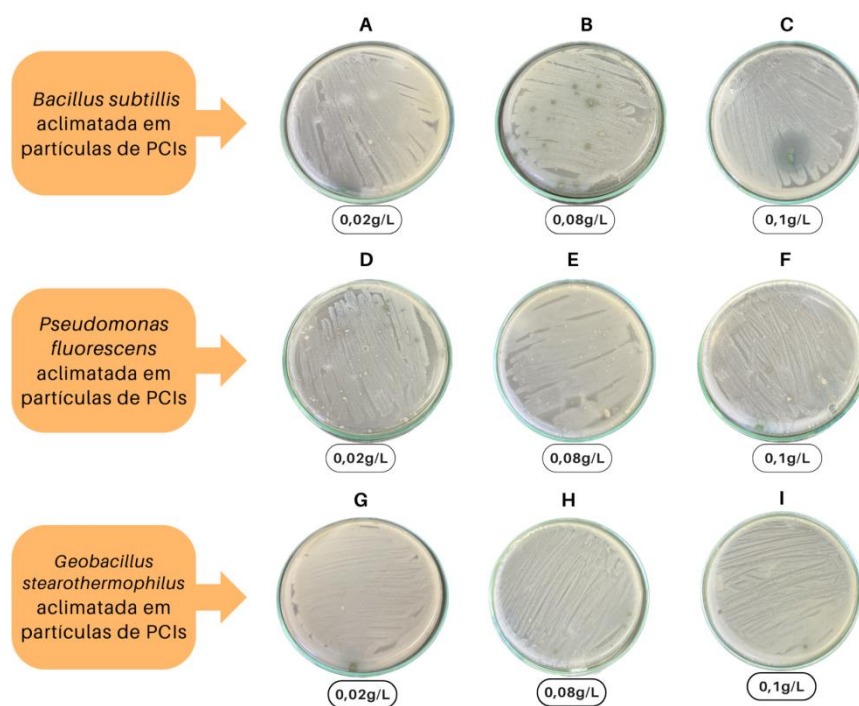
A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada a espectroscopia de energia dispersiva de raios-X (EDS) integrada ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foi realizada para identificar a presença de cobre na biomassa após processo de biolixiviação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Potencial de crescimento das bactérias em meio aclimatado com partículas de PCIs

Todas as bactérias testadas foram efetivamente capazes de crescer em meio de cultura contendo concentrações crescentes (0,02, 0,08 e 0,1 g/L) das partículas de PCIs como mostra as Figuras 3A, 3B e 3C para *Bacillus subtilis*, como também as Figuras 3D, 3E e 3F para *Pseudomonas fluorescens* e Figura 3G, 3H, 3I para *Geobacillus stearothermophilus*. Desta forma, fica evidenciado que as bactérias testadas possuem habilidade de adaptar a sua fisiologia para sobrevivência à exposição de metais como o cobre e demais metais presente nas PCIs.

Figura 8 - Aclimação de *Bacillus subtilis*, *Geobacillus stearothermophilus* e *Pseudomonas fluorescens* em diferentes concentrações de cobre presente nos PCIs



3.2 Condutividade elétrica como ferramenta para identificação da presença de metais na solução biolixiviada

Estudos mostram que quanto maior a condutividade, melhor condutor elétrico o material será. E quanto menor for o valor da condutividade, melhor isolante elétrico o material será. A máxima condutividade elétrica foi detectada após 336h (15 dias) com valores de 18,98 S/m, 17,58 S/m e 17,31 S/m de eletrólitos na solução biolixiviada por *Pseudomonas fluorescens*, *Geobacillus stearothermophilus* e *Bacillus subtilis*, respectivamente.

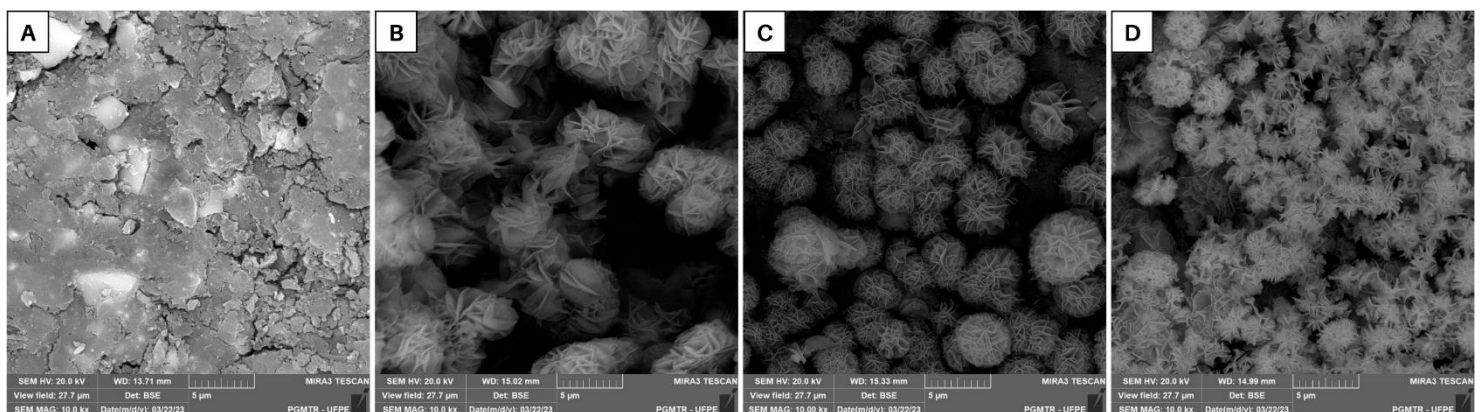
Tabela 3 - Avaliação da condutividade elétrica após biolixiviação dos metais presentes nas Placas de circuito impresso (PCIs) por *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* e *Geobacillus stearothermophilus*

TEMPO (h)	<i>Bacillus subtilis</i> (S/m)	<i>Pseudomonas fluorescens</i> (S/m)	<i>Geobacillus stearothermophilus</i> (S/m)
0	6,50	5,12	6,10
24	9,70	8,88	9,30
48	10,88	9,51	11,16
72	11,78	9,60	11,60
96	11,70	10,20	11,80
120	12,50	12,61	12,40
144	13,80	17,92	12,96
168	15,30	17,80	13,45
192	15,50	17,85	13,80
216	14,98	18,20	13,95
240	15,40	18,30	14,10
264	15,57	18,50	14,75
288	16,20	18,46	14,97
312	16,67	18,50	16,20
336	17,31	18,98	17,58

3.3 Características das PCIs após biolixiviação avaliado por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A Figura 4 mostra as placas de circuito impresso PCIs visualizadas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) após biolixiviação. Na Figura 4A é possível identificar as características da superfície da placa controle (sem tratamento de biolixiviação), enquanto na Figura 4B observa-se a placa PCIs após biolixiviação por *Bacillus subtilis*, na Figura 4C a placa PCIs após biolixiviação por *Pseudomonas fluorescens* e na Figura 4D a placa PCIs após biolixiviação por *Geobacillus stearothermophilus*.

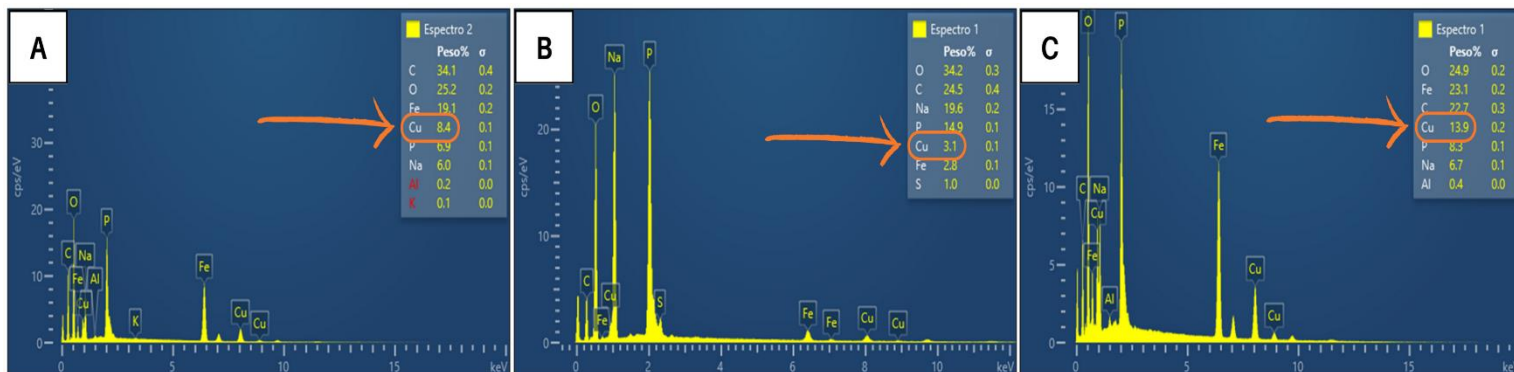
Figura 9 - Características da superfície da PCI após o processo de biolixiviação visualizadas na lente de 10kx



3.4 Identificação por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da capacidade adsorvente das biomassas de *Bacillus subtilis*, *Pseudomonas fluorescens* e *Geobacillus stearothermophilus*

A Figura 5 mostra o potencial que as bactérias tiveram de adsorção o cobre presente nas PCIs. Valores significativos de adsorção do cobre foram obtidos pelo *Bacillus subtilis* (8,4%)(Figura 5A) e *Pseudomonas fluorescens* (3,1%) (Figura 5B) após 15 dias. Porém, a máxima capacidade de adsorção do cobre (13,9%) ocorreu pela biomassa de *Geobacillus stearothermophilus* (Figura 5C).

Figura 10 - Análise por espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da biomassa: (A) *Bacillus subtilis*, (B) *Pseudomonas fluorescens* e (C) *Geobacillus stearothermophilus*



CONCLUSÃO

O bioprocesso de bilixiviação realizado a partir do cultivo submerso promoveu a máxima capacidade de adsorção do cobre (13,9%) pela biomassa de *Geobacillus stearothermophilus* após 15 dias de cultivo. Além disso, o resultado da microscopia eletrônica de varredura- MEV mostrou a formação de pits de corrosão por todas as cepas estudadas indicando o fenômeno da biolixiviação. Assim, a bactéria *Geobacillus stearothermophilus* mostrou ser promissora para extração de cobre de REEs com potencial econômico de estimular o reaproveitamento e a reinserção do cobre metálico na cadeia produtiva contribuindo com a economia circular, a sustentabilidade e a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Bolsa da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) Processo nº 88887 636956/2021-00 Marcelly Figueiredo Alves; ao Projeto de Pesquisa FACEPE APQ-1295-2.12/21 de Rosileide F. da Silva Andrade, e ao Grant CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) Processo nº 312241/2022-4 a Galba M. Campos-Takaki e a Universidade Católica de Pernambuco e a disponibilização dos laboratoriais do NPCIAMB-UNICAP.

REFERÊNCIAS

- BRANDL, H.; BOSSHARD, R.; WEGMANN, M. Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. **Hydrometallurgy**, v. 59, n. 2-3, p. 319-326, 2001.
- CIACA, Alessandra de Magalhães. **Efeito do descarte incorreto de pilhas sobre a microbiota do solo e o desenvolvimento do rabanete= effect of incorrect disposal of batteries on microbiota of soil and development of radish**. 2015. Dissertação de Mestrado. Universidade Camilo Castelo Branco.
- CHAERUN, S. K.; SULISTYO, R. S.; MINWAL, W. P.; MUBAROK, M. Z. **Indirect bioleaching of low-grade nickel limonite and saprolite ores using fungal metabolic organic acids generated by *Aspergillus niger***. **Hydrometallurgy**, v. 174, p. 29-37, 2017.
- CHAUDHARY, N.; BANERJEE, T.; IBRAHIM, N.; SIBI, G. **Fungal leaching of iron ore: 425 isolation, characterization and bioleaching studies of *Penicillium verruculosum***. **American Journal Microbiology**, v.5, p.27-32, 2014.
- DE BESSA FERREIRA, Juliana Martins; FERREIRA, Antônio Claudio. **A sociedade da informação e o desafio dasucata eletrônica**. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**, v. 3, n. 3, p. 157-170, 2008.
- DOCKRELL, Mark EC; PURCHASE, Diane; PRICE, Robert G. E-waste and metal contamination in the environment-Health effects. 2023.
- GIESE, E. C. Inovações tecnológicas na biomineração de minérios lateríticos de níquel e cobalto. **Tecnologia emMetalurgia Materiais e Mineração**, v. 16, n. 4, p. 558-566, 2019a.
- GIESE, E. C. **Os desafios da biometalurgia frente ao crescimento das minas urbanas**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2020. Série Estudos e Documentos, 104. 41 p. 2020.
- GIESE, Ellen C.; BLANCO, José; LINS, Fernando A. F.; XAVIER, Lúcia H. S. M. **Mineração urbana e cooperativismo : uma abordagem sobre a reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro : CETEM/MCTI, 27 p, 2021.
- GU, T.; RASTEGAR, S.O.; MOUSAVI, S.M.; LI, M.; ZHOU, M. **Advances in bioleaching for recovery of metalsand bioremediation of fuel ash and sewage sludge**. **Bioresource Technology**, v. 261, p. 428- 440, 2018.
- HENNEBEL, T.; BOON, N.; MAES, S.; LENZ, M. **Biotechnologies for critical raw material recovery from primary and secondary sources: R & D priorities and future perspectives**. **New Biotechnology**, v. 32, p. 121- 127, 2015.
- Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. C. R. (2017). E-waste: **An overview on generation, collection, legislation and recycling practices**. **Resources, Conservation and Recycling**, 122, 32–42. doi:10.1016/j.resconrec.2017.01.018, 2017.
- NUNES, Járison C. et al. Lixiviação de sais e produção de maracujazeiro irrigado com água de baixa e alta salinidade. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, p. 393-399, 2023

PACHECO, Genilson Jacinto; DE CAMPOS, Tácio Mauro Pereira; DE MATTOS NASCIMENTO, Daniel Luiz. Análise do sistema de gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos da Alemanha e suas influências na logística reversa do município do Rio de Janeiro. **Sistemas & Gestão**, v. 13, n. 4, p. 541-556, 2018.

RAJESH, Ramachandran; KANAKADHURGA, Dharmaraj; PRABAHARAN, Natarajan. Electronic waste: A critical assessment on the unimaginable growing pollutant, legislations and environmental impacts. **Environmental Challenges**, v. 7, p. 100507, 2022.

RODRIGUES, Éllen Francine et al. **Recovery of copper and gold from computer printed circuit boards by bioleaching with *Aspergillus niger***. 2020.

RIBEIRO NETO, Wilson Alves. **Bióliviação de minério de cobre da mina de Sossego, PA - Companhia Vale do Rio Doce**. 2007. 54 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Química, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/88037>>.

SRICHANDAN, H.; MOHAPATRAB, R. K.; PARHIB, P. K.; MISHRA, S. **Bioleaching approach for extraction of metal values from secondary solid wastes: A critical review**. **Hydrometallurgy**, v.189, p.105-122, 2019.

UTIMURA, Solange Kazue. **Uso da bióliviação no processo de reciclagem de cobre proveniente dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE)**. 2020. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-15012021-091227/pt-br.php>. Acesso em: 04 jan. 2023.

VANGASSE, Carlos Alberto Vanderlei. **O vórtice do lixo eletrônico no instituto federal de alagoas: Prolongamento do reaproveitamento de componentes eletrônicos**. 2020. 48 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Análise de Sistemas Ambientais) – Programa de Pós Graduação em Análise de Sistemas Ambientais, Centro Universitário CESMAC, Maceió-AL, 2020.

Yamane, Luciana Harue, Espinosa, Denise Crocce Romano e Tenório, Jorge Alberto Soares: **Bióliviação de cobre de sucata eletrônica**. Rem: Revista Escola de Minas [online]. 2011, v. 64, n. 3 [Acessado 16 Setembro 2021], pp. 327-333. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0370-44672011000300011>>. Epub 03 Out 2011.

ZHAO, Wenting et al. The reuse of electronic components from waste printed circuit boards: a critical review. **Environmental Science: Advances**, v. 2, n. 2, p. 196-214, 2023.

CAPÍTULO III

Patente depositada
Número do Processo: BR 10 2023 015311 9



Pedido nacional de Invenção, Modelo de Utilidade, Certificado de Adição de Invenção e entrada na fase nacional do PCT

Número do Processo: BR 10 2023 015311 9

Dados do Depositante (71)

Depositante 1 de 1

Nome ou Razão Social: UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO

Tipo de Pessoa: Pessoa Jurídica

CPF/CNPJ: 10847721000195

Nacionalidade: Brasileira

Qualificação Jurídica: Instituição de Ensino e Pesquisa **Endereço:** Rua

do Príncipe, 526 - Boa Vista

Cidade: Recife

Estado: PE

CEP: 50050-900

País: Brasil

Telefone: 81 21194088

Fax:

Email: nit@unicap.br

Dados do Pedido

Natureza Patente: 10 - Patente de Invenção (PI)

Título da Invenção ou Modelo de Utilidade (54): PROCESSO BIOTECNOLÓGICO PARA RECUPERAÇÃO DO COBRE EM DESCARTE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PLACA MÃE)

Resumo: A presente invenção refere-se a um bioprocesso para extração do cobre presente nas Placas de Circuito Impresso (PCIs)-(Placa mãe) dos Resíduos Eletroeletrônicos (REEEs). O cobre foi biolixiviado exclusivamente pela bactéria Gram negativa, *Pantoea agglomerans* UCP 1581, previamente adaptada às partículas das PCIs, em cultivo submerso contendo placas (PCIs) de 2cm, sem a necessidade de associação a métodos químicos e ou físicos. A condutividade elétrica e a absorção atômica foram as análises realizadas para identificar a eficiência da recuperação do cobre por solubilização e adsorção, respectivamente. Assim, a *Pantoea agglomerans* foi capaz de promover o biotratamento do cobre metálico, seguido de adsorção de 37,12% do cobre pela biomassa após 15 dias de processo de biolixiviação. Portanto, o bioprocesso da presente invenção apresenta grande potencial econômico e inovador e propõe o pedido para a invenção tecnológica de reaproveitamento e reinserção do cobre metálico na cadeia produtiva.

Figura a publicar: 1

REIVINDICAÇÕES

PROCESSO BIOTECNOLÓGICO PARA RECUPERAÇÃO DO COBRE EM DESCARTE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PLACA MÃE)

01. A presente invenção refere-se a um processo de recuperação de cobre por biolixiviação **caracterizado pela** solubilização do metal presente no descarte de Placas de Circuito Impresso-PCIs (Placa Mãe) pela bactéria Gram negativa *Pantoea agglomerans* UCP1581 (Figura 1).
02. Processo de acordo com a reivindicação 1:
Caracterizado por ser um bioprocessos realizado a partir do cultivo submerso da bactéria *Pantoea agglomerans* UCP1581 previamente adaptada a partículas de Placa de Circuito Impresso (Placa Mãe).
03. Processo de acordo com a reivindicação 1:
Caracterizado por demonstrar a vantagem de recuperação do cobre exclusivamente pela biomassa da bactéria *Pantoea agglomerans* UCP1581, sem a necessidade de associação aos processos químico e ou físico.
04. Processo de acordo com a reivindicação 1:
Caracterizado por demonstrar uma rápida recuperação do cobre após 15 dias de cultivo da bactéria *Pantoea agglomerans* UCP1581.
05. Processo de acordo com a reivindicação 1:
Caracterizado por ser um biotratamento que promove a lixiviação do cobre metálico das PCIs (Placa Mãe).
06. Processo de acordo com a reivindicação 1:
Caracterizado por recuperar 37,12% do cobre presente no descarte das PCIs após bioprocessos de solubilização e adsorção bacteriana.

RELATÓRIO DESCRITIVO

PROCESSO BIOTECNOLÓGICO PARA RECUPERAÇÃO DO COBRE EM DESCARTE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PLACA MÃE)

→ Campo Técnico

[01] A presente invenção refere-se a um processo biotecnológico sustentável utilizando bactéria Gram negativa, mesofílica, nunca antes usada, para recuperação do cobre presente nas Placas de Circuito Impresso (PCIs)-(Placa Mãe) de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). O bioprocessamento ocorre por bilixiviação e adsorção do cobre promovido pela bactéria. Adicionalmente, a invenção é uma alternativa promissora nos campos de processos biotecnológicos de extração de cobre de REEE e possui potencial de estimular a economia circular, a sustentabilidade e ampliar a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos.

→ Estado da técnica

[02] Os Resíduos Eletroeletrônicos (REEEs) consistem equipamentos eletrônicos descartados ou obsoletos.

[03] Um dos principais componentes dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são as placas de circuito impresso (PCIs)-(Placa Mãe).

[04] As Placas de Circuito Impresso (PCIs)-(Placa Mãe) fazem parte de todos os equipamentos eletrônicos e sua composição é bastante variada.

[05] As placas de circuito impresso (PCIs)-(Placa Mãe) possuem em sua composição metais valiosos que podem ser recuperados incluindo o cobre, ouro, prata e paládio, com pureza e concentração superiores à mineração convencional.

[06] O cobre é encontrado na natureza na forma de minerais (como a calcopirita, calcocita, covelita, azurita, malaquita, etc). E por estar o cobre na forma de minerais, são necessários processamentos metalúrgicos para a obtenção do cobre metálico extraído desses minerais.

[07] Os métodos convencionais para recuperação de cobre em resíduos eletroeletrônicos (REEEs) consistem na pirometalurgia baseada na queima (combustão) dos resíduos eletrônicos para a recuperação dos metais preciosos, principalmente o cobre, e na hidrometalurgia que envolve a utilização de produtos químicos para a solubilização dos metais.

[08] As desvantagens dos métodos convencionais ligados a pirometalurgia consistem no elevado consumo de energia, baixa eficiência para recuperação dos metais preciosos e obtenção de compostos tóxicos (dioxinas e furanos). Enquanto que, a hidrometalurgia apresenta melhor controle sobre as condições das reações e um menor impacto ambiental que a pirometalurgia, porém é um método lento e com baixa seletividade.

[09] A biohidrometalurgia é considerada uma tecnologia sustentável e promissora para a recuperação dos metais presentes nas placas de circuito impresso obsoletas.

[10] A principal técnica de biometalurgia é a biolixiviação, na qual ocorre a solubilização de metais com o auxílio de reações metabólicas de micro-organismos, e a adsorção que consiste na remoção de metais da parede celular da biomassa bacteriana.

[11] As principais vantagens da biolixiviação quando comparada aos métodos convencionais (pirometalúrgicos ou hidrometalúrgicos) são o baixo custo do processo e a elevada eficiência do tratamento biológico.

[12] A solubilização e adsorção são métodos que favorecem a recuperação dos metais presentes nas placas de circuito impresso (PCIs)-(Placa Mãe) dos resíduos eletroeletrônicos (REEEs) por biolixiviação e ao mesmo tempo incentiva pesquisas inovadoras relacionadas ao processo de extração.

[13] Adsorção é um processo que utiliza micro-organismos para retenção, remoção ou recuperação de metais.

[14] O processo de adsorção permite que os metais sejam recuperados pela biomassa microbiana.

[15] A recuperação de cobre, a partir de placas de circuito impresso, está tecnicamente comprovada utilizando bactérias mesofílicas quimiolitotróficas (principalmente as espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans*), fungos (*Aspergillus simplicissimus*) ou bactérias cianogênicas (*Chromobacterium violaceum*).

[16] Os processos biológicos para recuperação dos metais utilizam frequentemente bactérias do gênero *Acidithiobacillus* sp. em período de biolixiviação entre 30-160 dias.

[17] O documento de patente número BR102017013183A2 reporta um processo de recuperação de metais de resíduos eletroeletrônicos, especificamente o cobre, através de processo químico/bacteriano para a solubilização e separação do metal. Esta invenção não apresenta metodologia compatível com o presente pedido de patente uma vez que possui método químico associado para solubilização do cobre.

[18] O documento de patente BR 102021014806-3 A2, intitulado “Processo para recuperação de cobre e ouro a partir de placas de circuito impresso” relata o processo para extração de cobre utilizando solução de H₂SO₄ seguido de processo de recuperação do cobre por eletrorrecuperação.

[19] O documento de patente CN108517410A, intitulado “A kind of method of metallic copper in hydrometallurgical recovery printed wiring board (PCB)”, descreve uma rota hidrometalúrgica para recuperação de metais de PCI submetidas à lixiviação com ácido clorídrico e portanto, não possui similaridade com o presente pedido de patente.

[20] O documento de patente CN108950218A intitulado “A method of recycling gold, silver and copper from waste printed circuit board”, descreve método para recuperação de cobre, ouro, prata e de PCI a partir da submissão das placas à calcinação em altas temperaturas, entre 850 e 980°C e portanto, não possui nenhuma similaridade com o presente pedido de patente.

[21] O documento de patente CN102108441A, intitulado “Multiple-step purifying method for precious metals of waste PCB (printed circuit board)”, descreve um método de recuperação dos metais constituintes das PCIs aplicando lixiviação com ácido sulfúrico. Dessa forma, o documento não possui nenhuma semelhança com o presente pedido de patente.

[22] O documento de patente CN104745824A intitulado “Method for recovering copper from waste circuit board”, descreve método para recuperação, unicamente, de cobre de PCI utilizando lixiviação em reator ultrassônico. Esta invenção não é compatível com o presente pedido de patente uma vez que o tratamento para recuperação do cobre foi utilizando lixiviação em reator ultrassônico.

[23] Com base nas anterioridades, as características de biolixiviação em patentes mostram novos processos para recuperação do cobre, porém geralmente associam a biolixiviação aos métodos químicos ou físicos.

→ Problemas do Estado da Técnica

[24] Agência Ambiental Europeia mostra que as substâncias perigosas estão presentes em todos os REEEs, porém em quantidades variadas.

[25] As abordagens da economia circular para os REEE são geralmente limitadas devido às baixas taxas de coleta ou tecnologias de recuperação ausentes.

[26] As placas de circuito impresso (PCIs) contêm diversas substâncias tóxicas, como por exemplo os metais pesados (mercúrio, cádmio, chumbo e outros).

[27] As placas PCI podem possuir cádmio e chumbo em sua constituição, esses metais são considerados resíduos perigosos, pois podem contaminar o solo quando colocados em lixões ou aterros sanitários domésticos.

[28] A maioria dos metais presentes nas placas de circuito impresso (PCIs) dos resíduos eletroeletrônicos (REEEs) não passa por nenhum processo de reciclagem e são depositados de maneira incorreta no meio ambiente.

[29] Os impactos na saúde humana e no meio ambiente são muitos e geralmente são advindos dos computadores obsoletos descartados inadequadamente.

[30] Os métodos hidrometalúrgicos apresentam alto consumo de água e produtos químicos, gerando uma grande quantidade de águas residuais perigosas. Além disso, o processo envolve a utilização de soluções ácidas para dissolver metais de interesse.

[31] Os métodos pirometalúrgicos demandam grande quantidade de energia e produz grande quantidade de resíduos sólidos.

[32] As inovações tecnológicas têm contribuído para o consumo inconsciente da sociedade e, conseqüentemente, para a alta descartabilidade de resíduos eletrônicos no ambiente.

[33] Ao serem incineradas, as placas PCI liberam dioxinas e furanos como poluentes.

[34] O processo inovador proposto na presente invenção apresenta tecnologia sustentável com forte potencial para contribuir com a economia circular, além de ser tecnologia não tóxica para o meio ambiente e para saúde, bem como apresenta-se como alternativa rápida e promissora para recuperação de metais valiosos de PCIs.

→ **Objetivo da invenção**

[35] Estimular por tratamento biológico por bactéria Gram negativa e mesofílica, nunca antes utilizada, a extração do cobre presente nas placas de circuito impresso por solubilização e adsorção, e ao mesmo tempo contribuir com a economia circular de forma segura, eficiente e em conformidade com padrões de sustentabilidade.

→ **Vantagens da Invenção**

[36] A placa de circuito impresso (PCI) é a mais valiosa dos resíduos eletrônicos, pois possuem uma considerável quantidade de metais com potencial de recuperação.

[37] A quantidade de cobre presente nas Placas de Circuito Impresso (PCIs) torna os resíduos eletroeletrônicos (REEEs) matéria-prima muito rica do ponto de vista econômico.

[38] O cobre, devido a ductibilidade, maleabilidade e boa condutividade elétrica é um metal largamente utilizado na fabricação de fios, cabos e ligas metálicas.

[39] A *Pantoea agglomerans* UCP1581 é uma bactéria Gram negativa que se adapta ao cobre e demonstra excelente desempenho na solubilização e adsorção deste metal.

[40] A recuperação dos Resíduos eletroeletrônicos (REEEs) esta ligada a décima quinta meta dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ODS) que visa recuperar e promover o uso sustentável dos ecossistemas terrestres.

[41] A concentração de metais valiosos que podem ser recuperados nos REEEs é até dez vezes maior que a quantidade extraída na mineração primária.

[42] A Biohidrometalurgia é uma tecnologia promissora que utiliza microrganismos para a recuperação dos metais, e não gera as águas residuais perigosas.

[43] A biolixiviação resulta na elevada taxa de recuperação de metais sem a necessidade de adição de produtos químicos tóxicos e baixo consumo de energia.

→ Descrição Geral da Invenção

[44] A presente invenção refere-se ao tratamento biológico aeróbico por bactéria Gram negativa mesofílica (*Pantoea agglomerans* UCP1581) para extração por biolixiviação do cobre presente nas placas de circuito impresso de modo eficiente e em conformidade a sustentabilidade.

[45] A extração do cobre presente nas PCIs é realizada pelo bioprocessamento de biolixiviação usando exclusivamente a bactéria *Pantoea agglomerans* UCP1581.

[46] O bioprocessamento realizado a partir do cultivo submerso da bactéria *Pantoea agglomerans* UCP1581 previamente adaptada a Placa de Circuito Impresso promove a produção de 0,9g.L de biomassa.

[47] O tratamento microbiológico promove a solubilização do cobre metálico seguido da bioadsorção na biomassa.

[48] *Pantoea agglomerans* UCP1581 é adaptada para crescer na presença de fragmentos das Placas de Circuito Impresso-(Paca Mãe) (0,1g/L), sem necessidade de fonte suplementar de energia.

[49] A condutividade elétrica confirma na solução biolixiviada a máxima presença do cobre em 15 dias.

[50] O pH da solução biolixiviada é 6,7 ao final do processo.

[51] A absorção atômica mostra que *Pantoea agglomerans* UCP1581 recupera 37,12% do cobre das PCIs após 15 dias de processo de biolixiviação.

→ Descrição Detalhada da Invenção

[52] A etapa inicial da presente invenção consiste na desmontagem e remoção da máscara de solda das PCIs.

[53] A desmontagem das PCIs foi realizado manualmente retirando os capacitores por desencaixe com auxílio de pinças e alicates para remoção total.

[54] A remoção da máscara das PCIs foi realizada por processo mecânico através de lixadeira orbital de palma. Os terminais de contato entre a memória RAM e a placa mãe foram separados (cortados em fragmentos) do restante da placa e em seguida, aplicado método físico-químico imergindo as PCIs em Soda Cáustica a 60°C sob agitação durante 10 min para remoção completa da máscara de solda.

[55] As placas tiveram tamanho de partícula determinados utilizando guilhotina manual até obtenção do tamanho de partícula de 2cm².

[56] Outra parte da PCI foi triturada até a obtenção do tamanho de partícula de 250µm (mesh nº60) para realizar aclimatação da bactéria.

[57] A esterilização das placas PCIs foi realizada pela imersão em álcool 70% durante 24h, e em seguida foram expostas a luz UV durante 30min.

[58] O microrganismo utilizado foi a bactéria *Pantoea agglomerans* UCP 1581 cultivada a 37°C durante 24h.

[59] O crescimento e adaptação da *Pantoea agglomerans* ocorreu no meio de cultura Ágar Nutriente (AN) adicionado de 0,1g.L da placa de circuito impresso (PCI) triturada.

[60] A solubilização e adsorção do cobre foram realizadas no meio de cultivo T&K preparado a partir das soluções tampão (A e B). O tampão A possui 0,625 g/L (NH₄)₂SO₄, 0,625 g/L K₂HPO₄, 0,625 g/L MgSO₄.7H₂O. Em seguida, a solução B foi preparada (166,5 g/L FeSO₄.7H₂O). O pH das duas soluções foram ajustados para 7. A solução B foi esterilizada por filtração em Millipore (0,22 µm) e a solução A foi esterilizada em autoclave a 121 °C. Em seguida, as duas soluções (A e B) na proporção de 4:1 foram unidas em frascos de Erlenmeyer de 250 mL contendo 72 mL de solução (72 mL da solução A e 18mL da solução B) para obtenção do meio T&K. Ao meio T&K foi adicionado a placa de circuito impresso (tamanho de 2cm²) (Figura 1).

[61] O ensaio iniciou após adição do inóculo bacteriano 10⁷cel/mL (10 % v/v) durante 15 dias, temperatura de 37°C e 170 rpm.

[62] A separação do sobrenadante biolixiviado da biomassa foi realizado por

centrifugação a 8000 rpm por 20 min a 10°C.

[63] O pH final do processo foi avaliado no sobredante livre de células.

[64] A solubilização do cobre na solução biolixiviada foi identificada por condutividade elétrica.

[65] A determinação da porcentagem de cobre lixiviado e adsorvido foi detectada por absorção atômica (Tabela 1).

Tabela 1 – Porcentual do cobre adsorvido pela biomassa avaliado por absorção atômica.

BACTÉRIA	RECUPERAÇÃO DO COBRE ADSORVIDO PELA BIOMASSA
<i>Nea agglomerans</i> UCP 1581	37,12 (%)

1 / 1

RESUMO**PROCESSO BIOTECNOLÓGICO PARA RECUPERAÇÃO DO COBRE EM
DESCARTE DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO (PLACA MÃE)**

A presente invenção refere-se a um bioprocesso para extração do cobre presente nas Placas de Circuito Impresso (PCIs)-(Placa mãe) dos Resíduos Eletroeletrônicos (REEEs). O cobre foi biolixiviado exclusivamente pela bactéria Gram negativa, *Pantoea agglomerans* UCP 1581, previamente adaptada às partículas das PCIs, em cultivo submerso contendo placas (PCIs) de 2cm, sem a necessidade de associação a métodos químicos e ou físicos. A condutividade elétrica e a absorção atômica foram as análises realizadas para identificar a eficiência da recuperação do cobre por solubilização e adsorção, respectivamente. Assim, a *Pantoea agglomerans* foi capaz de promover o biotratamento do cobre metálico, seguido de adsorção de 37,12% do cobre pela biomassa após 15 dias de processo de biolixiviação. Portanto, o bioprocesso da presente invenção apresenta grande potencial econômico e inovador e propõe o pedido para a invenção tecnológica de reaproveitamento e inserção do cobre metálico na cadeia produtiva.

DESENHO

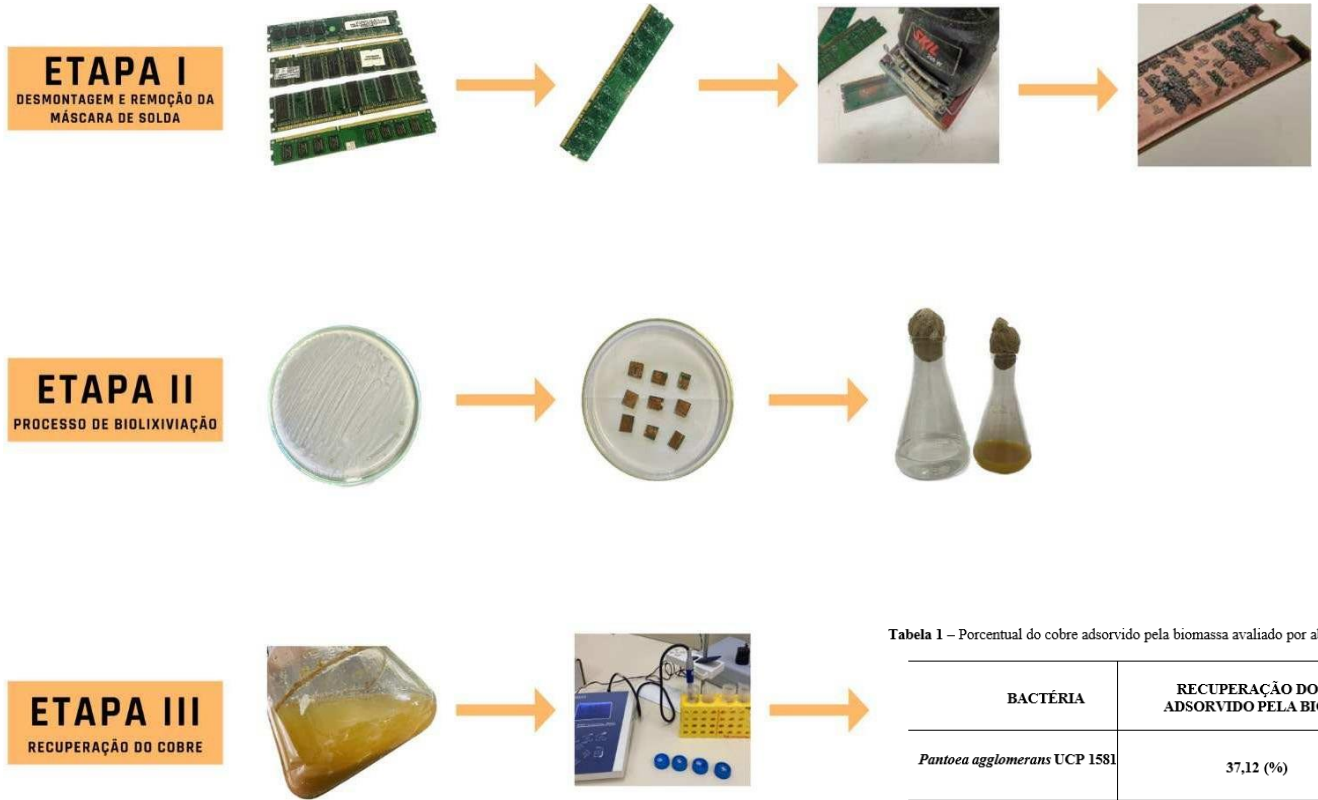


Tabela 1 – Porcentual do cobre adsorvido pela biomassa avaliado por absorção atômica.

BACTÉRIA	RECUPERAÇÃO DO COBRE ADSORVIDO PELA BIOMASSA
<i>Pantoea agglomerans</i> UCP 1581	37,12 (%)

FIGURA 1

CAPÍTULO IV

CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Todas as bactérias estudadas tiveram alto potencial de crescimento na presença dos metais das PCIs trituradas.
- O bioprocesso de biolixiviação realizado a partir do cultivo submerso promoveu a máxima capacidade de adsorção do cobre (**13,9%**) pela biomassa do *Geobacillus stearothermophilus* após 15 dias de cultivo.
- O resultado da microscopia eletrônica de varredura - MEV mostrou a formação de pits de corrosão por todas as cepas estudadas, indicando o fenômeno da biolixiviação.
- A bactéria *Geobacillus stearothermophilus* mostrou ser promissora para extração de cobre de REEes com potencial econômico de estimular o reaproveitamento e a reinserção do cobre metálico na cadeia produtiva contribuindo com a economia circular, a sustentabilidade e a reciclagem dos resíduos eletroeletrônicos.
- A *Pantoea agglomerans* foi capaz de promover o biotratamento do cobre metálico, seguido de adsorção de 37,12% do cobre pela biomassa após 15 dias de processo de biolixiviação.
- O bioprocesso da presente invenção apresenta grande potencial econômico e inovador e propõe o pedido para a invenção tecnológica de reaproveitamento e reinserção do cobre metálico na cadeia produtiva.