

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA DO PROCESSO DE RECICLAGEM
DE SUCATA ELETRÔNICA

Rafael Miranda Castro de Ávila

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professora Dra. Rejane Maria Candiota Tubino

Porto Alegre

2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço à professora Dr^a Rejane Tubino por ter aceitado ser minha orientadora e por ter auxiliado a estruturar este trabalho sobre um tema de grande relevância e impacto ambiental.

À Getnet, em especial aos meus gestores, Felipe dos Santos Borges e Rodrigo Caldoncelli Carvalho, e demais colegas pela compreensão e apoio nos últimos semestres da minha graduação e por me proporcionarem tantas conquistas profissionais e pessoais.

Ao professor Dr. Wagner Viana Bielefeldt e toda equipe do Laboratório de Siderurgia que me proporcionaram 2 anos de muito aprendizado e desenvolvimento como bolsista de Iniciação Científica para a minha formação acadêmica.

Aos demais colegas e amigos de graduação da Engenharia Metalúrgica que contribuíram para a minha jornada.

Aos meus amigos e amigas que me apoiaram ao longo de toda a minha graduação e compreendendo o meu momento de vida.

À minha família, em especial aos meus pais Raimundo Castro de Ávila e Rosa Amélia de Miranda Ávila por todo apoio e crença de que eu poderia estar aqui, acreditando mais em mim do que eu mesmo, que foi fundamental para a minha graduação.

Por fim, agradeço à pessoa mais importante da minha vida, à Andressa Lazzari, por todo amor, carinho, paciência e compressão ao longo desses anos, sendo fundamental para que eu conseguisse chegar até aqui.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	V
LISTA DE TABELAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral.....	3
2.2 Objetivos Específicos	3
3 VISÃO GERAL DA SUCATA ELETRÔNICA E LOGÍSTICA REVERSA ...	4
3.1 Gestão de resíduos e legislação	4
3.2 Logística reversa	6
3.3 Sucata eletrônica	8
4 METODOLOGIA	12
5 PROCESSOS METALÚRGICOS CONVENCIONAIS DE RECUPERAÇÃO DE METAIS DE SUCATA ELETRÔNICA	17
5.1 Pirometalurgia.....	18
5.2 Hidrometalurgia	20
6 BIOLIXIVIAÇÃO E PROCESSOS BIOLÓGICOS PARA RECUPERAÇÃO DE METAIS	25
6.1 Biometalurgia.....	25
6.2 Processos biológicos	30
6.2.1 Biossorção	32
6.2.2 Fitorremediação	32
6.2.3 Sistema bioeletroquímico (BES)	33
6.3 Aspectos bioeconômicos.....	33
7 APLICAÇÃO DE MATERIAIS RECUPERADOS EM TECNOLOGIAS VERDES E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA	36

7.1	Produção de Hidrogênio	36
7.2	Tecnologias verdes para produção de hidrogênio.....	37
7.3	O uso de materiais recuperados de resíduo eletrônico para armazenamento de energia.....	38
8	ANÁLISE DA REVISÃO DA LITERATURA.....	41
9	CONCLUSÕES	44
10	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	46
	REFERÊNCIAS	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Processo logístico reverso.....	6
Figura 3.2 Fluxograma do processo inicial de reciclagem de computadores.....	11
Figura 3.3 Fluxograma das etapas envolvidas em processos metalúrgicos de recuperação de metais.....	11
Figura 5.1 Esquema das etapas envolvidas do processo de Pirometalurgia.....	18
Figura 5.2 Esquema das etapas envolvidas do processo de Hidrometalurgia.....	21
Figura 6.1 Aspectos envolvidos na biolixiviação.....	26
Figura 6.2 Esquema representativo de técnicas biometalúrgicas.....	31
Figura 6.3 Economia circular e gestão de resíduo eletrônico.....	34
Figura 7.1 Esquema representativo de sistemas via eletrólise.....	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Motivos estratégicos para logística reversa.....	7
Tabela 3.2 Composição média de sucata eletrônica.....	8
Tabela 3.3 Composição média de metais em placa de circuito impresso.....	9
Tabela 3.4 Elementos perigosos em componentes eletrônicos.....	10
Tabela 4.1 <i>Strings</i> de busca.....	13
Tabela 4.2 Quadro comparativo dos principais artigos.....	15
Tabela 5.1 Emissões gasosas do processo de pirometalurgia.....	19
Tabela 5.2 Técnicas de recuperação.....	22
Tabela 6.1 Micróbios utilizados na biolixiviação.....	27
Tabela 6.2 Valor potencial dos metais encontrados em resíduos eletrônicos.....	35
Tabela 7.1 Eletrocatalisadores recuperados para capacitores.....	39

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

BES - Sistema Bioeletroquímico

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

EDTA - Ácido etilenodiamino tetra-acético

HAV – Alto valor agregado

LIB – Baterias de Lítio

ONU – Organização das Nações Unidas

PMGIRS - Planos Municipais de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

REEE - Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

RESUMO

A geração de resíduos eletrônicos é um dos grandes problemas para o meio-ambiente pela crescente produção de eletrônicos e pela tendência de evolução da tecnologia para os equipamentos eletrônicos, tornando-os obsoletos em curto espaço de tempo. Neste contexto, a reciclagem de resíduos eletrônicos, recuperando os metais presentes, é um processo que surge como alternativa para redução dos impactos ambientais e sociais, de forma a garantir a reutilização ou destinação correta destes materiais. A literatura apresenta uma grande quantidade de estudos voltados para processo de recuperação de metais a partir de resíduo eletrônico e reciclagem e desta forma, foi realizada, por meio de uma revisão sistemática da literatura (RSL), definindo o conjunto de trabalhos publicados, tendo como critérios estabelecidos serem artigos de revisão, da língua inglesa e do período entre 2017 e 2023, atingindo um total de 50 artigos de revisão. A partir do conjunto de trabalhos foram propostos diversos questionamentos acerca do processo de reciclagem de resíduos eletrônicos para avaliar os aspectos dos principais processos metalúrgicos para recuperação de metais, impactos ambientais, o que a literatura apresenta de técnicas dos processos de reciclagem, quais principais elementos recuperados, quais os principais aspectos e técnicas utilizadas para biolixiviação e processos biológicos, e como os resíduos eletrônicos podem ser utilizados para tecnologias verdes.

Palavras-chave: resíduos eletrônicos, reciclagem, recuperação de metais, impactos ambientais.

ABSTRACT

Electronic waste generation is a major environmental problem due to the increasing production of electronics and the trend of technological evolution for electronic equipment, making them outdated in a short period of time. In this context, the recycling of electronic waste, recovering the metals, is a process that emerges as an alternative to reduce environmental and social impacts, in order to guarantee the reuse or correct destination of these materials. The literature presents many studies focused on the process of recovering metals from electronic waste and recycling. Thus, a systematic literature review (SLR) was carried out, defining the set of published works, with the established criteria being review articles, in the English language, and from the period between 2017 and 2023, reaching a total of 50 review articles. From the set of works, several questions were proposed about the recycling process of electronic waste to evaluate the aspects of the main metallurgical processes for metal recovery, environmental impacts, what the literature presents in terms of recycling process techniques, the main recovered elements, the main aspects and techniques used for bioleaching and biological processes, and how electronic waste can be used for green technologies.

Keywords: electronic waste, recycling, metal recovery, environmental impacts.

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna, os equipamentos eletrônicos são parte integrante do cotidiano da população, como celulares, computadores, TVs, eletrodomésticos e outros dispositivos que estão presentes em nossas casas, trabalhos e escolas. No entanto, o descarte inadequado desses equipamentos pode causar sérios problemas ambientais e sociais.

Os resíduos eletrônicos, também conhecidos como REEE, são compostos por materiais que podem ser tóxicos e perigosos para a saúde e o meio ambiente. Entre eles, destacam-se metais pesados, como chumbo, mercúrio e cádmio, que podem contaminar o solo, a água e o ar. Além disso, os REEEs podem liberar gases de efeito estufa, contribuindo para o aquecimento global.

Segundo Kaza *et al* (2018) a geração de resíduos eletrônicos deve passar de 2 bilhões de toneladas por ano em 2016 para 3,4 bilhões de toneladas por ano até 2050, no qual a maioria será observada em países de baixa renda, onde a geração deve triplicar. Isso representa um desafio global, que requer ações urgentes de todos os setores da sociedade.

A reciclagem de resíduos eletrônicos é uma das principais formas de reduzir os impactos ambientais e sociais desse problema. O processo de reciclagem permite a recuperação de materiais valiosos, como metais, plásticos e vidros, que podem ser reutilizados na fabricação de novos produtos.

Além de contribuir para a preservação do meio ambiente, a reciclagem de REEEs também gera empregos e renda. A reciclagem de REEE é uma atividade que requer mão de obra especializada. As etapas do processo de reciclagem incluem coleta, triagem, desmontagem, processamento e destinação final, e cada uma destas etapas exige profissionais com diferentes habilidades e conhecimentos. A reciclagem de REEE também pode movimentar a economia de diversas formas. A produção de novos produtos a partir de materiais reciclados gera receita para as empresas. Além disso, a reciclagem pode gerar impostos e outras receitas para o governo.

Para aumentar a reciclagem de REEEs, é importante que a sociedade esteja consciente da importância desse processo. É preciso conscientizar as pessoas sobre os impactos ambientais e sociais do descarte inadequado de equipamentos eletrônicos e incentivar a entrega desses resíduos a pontos de coleta e reciclagem.

Os equipamentos são todos aqueles produtos cujo funcionamento depende do uso de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos e podem ser divididos em quatro subtipos, de acordo com o tamanho e a aplicação: linha branca, marrom, azul e verde (ABDI, 2013).

- Linha Branca: refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar. Esses equipamentos são geralmente descartados por empresas e instituições e são coletados por empresas especializadas.
- Linha Marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras.
- Linha Azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras; os equipamentos das linhas marrom ou azul são geralmente descartados por consumidores individuais e são coletados por empresas de reciclagem ou por pontos de coleta públicos.
- Linha Verde: computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares. Esses equipamentos contêm metais preciosos, como ouro, prata e cobre, que podem ser recuperados por meio da reciclagem.

Ao fim de sua vida útil, esses produtos passam a ser considerados resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Idealmente, só chegam a esse ponto uma vez esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso.

O governo também tem um papel importante a desempenhar na promoção da reciclagem de REEEs. É preciso criar políticas públicas que incentivem a coleta e a reciclagem desses resíduos, bem como a redução do consumo de equipamentos eletrônicos.

A reciclagem de resíduos eletrônicos é uma solução eficaz para reduzir os impactos ambientais e sociais desse problema. Agindo de forma conjunta, governo, sociedade civil e setor privado podem contribuir para a construção de um futuro mais sustentável.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem por objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre os processos de reciclagem de sucata eletrônica e reuso de materiais recicláveis em equipamentos eletrônicos.

2.2 Objetivos Específicos

Para que este trabalho alcance o seu objetivo geral, os objetivos específicos são:

- Identificar processos de reciclagem de resíduos eletrônicos;
- Apontar o que a literatura apresenta sobre processos de recuperação de sucata eletrônica;
- Identificar o impacto ambiental em processos metalúrgicos;
- Determinar os processos com melhores resultados ambientais;
- Indicar pesquisas e estudos realizados no campo de recuperação e reciclagem de materiais eletrônicos;
- Identificar a utilização de resíduos eletrônicos para tecnologias verdes.

3 VISÃO GERAL DA SUCATA ELETRÔNICA E LOGÍSTICA REVERSA

A sucata eletrônica, também conhecida como resíduo de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), é um tipo de resíduo que vem crescendo de forma exponencial nos últimos anos. Isso ocorre devido ao aumento da produção e consumo de produtos eletrônicos, que têm uma vida útil relativamente curta.

A sucata eletrônica pode ser composta por uma variedade de materiais, incluindo metais preciosos, como ouro, prata e cobre, metais pesados, como chumbo e mercúrio, e outros materiais, como plástico e vidro. O descarte inadequado desses resíduos pode causar sérios problemas ambientais, como a contaminação do solo, da água e do ar.

Uma maneira de garantir a destinação adequada dos resíduos sólidos é a logística reversa, que se trata de um conjunto de ações que visam garantir a destinação adequada dos resíduos sólidos. No caso da sucata eletrônica, a logística reversa consiste na coleta, transporte, tratamento e destinação final desses resíduos.

De um modo geral, é importante se ter uma visão dos principais aspectos da gestão de resíduos e a legislação vigente em relação aos resíduos, a implementação da logística reversa e ter compreensão da composição e possíveis riscos dos resíduos gerados.

3.1 Gestão de resíduos e legislação

No Brasil, a legislação sobre gestão de resíduos é regulamentada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei nº 12.305 (BRASIL, 2010), regulamentada decreto nº10.936, de 12 de janeiro de 2022 (BRASIL, 2022). A PNRS estabelece princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes e metas para a gestão integrada e o gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos.

A PNRS estabelece as seguintes responsabilidades para os geradores de resíduos:

- Geração: adotar medidas para reduzir a geração de resíduos;
- Classificação: classificar os resíduos de acordo com suas características físicas, químicas, biológicas, de periculosidade e de valor econômico;
- Acondicionamento: acondicionar os resíduos de forma a evitar danos ou contaminações ao meio ambiente e à saúde pública;

- Coleta: coletar os resíduos de forma seletiva, ou seja, separadamente por tipo de material;
- Transporte: transportar os resíduos de forma segura e adequada;
- Destinação final: destinar os resíduos de forma ambientalmente adequada.

Ainda, a Política Nacional de Resíduos Sólidos institui uma série de instrumentos para fins de gestão de resíduos:

- Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS): documento obrigatório para todos os municípios brasileiros, que deve conter diretrizes para a gestão integrada de resíduos sólidos no município;
- Coleta seletiva: coleta de resíduos separadamente por tipo de material;
- Logística reversa: conjunto de ações que envolvem o recolhimento, transporte, armazenamento, processamento e destinação final de produtos, embalagens e outros materiais após o consumo ou uso;
- Tratamento dos resíduos sólidos: conjunto de procedimentos para reduzir a quantidade de resíduos, alterá-los para outro estado ou forma, ou confiná-los em local adequado;
- Destinação final ambientalmente adequada dos rejeitos: destinação final de resíduos que não podem ser reciclados, reutilizados ou tratados, de forma a evitar danos ou contaminações ao meio ambiente e à saúde pública.

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) também tem grande relevância no papel de classificar este setor, estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos sólidos perigosos. Esta norma define resíduos perigosos como aqueles que, em razão de suas características físicas, químicas, biológicas, inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, podem causar danos à saúde pública ou ao meio ambiente.

A norma NBR 10.004 se faz importante para garantir segurança e proteção ao meio ambiente, facilitar o tratamento e a destinação final, e orientar os geradores de resíduos sólidos em relação às suas responsabilidades. Além disso, a norma é aplicável a todos geradores de resíduos sólidos em todas as etapas de resíduos sólidos, desde a geração até a destinação final.

3.2 Logística reversa

A logística reversa pode ser definida como uma área que planeja, opera e controla o fluxo e as informações logísticas de bens de pós-venda e consumo, conforme LEITE (2005, p.16-17). O tipo de logística reversa pós consumo é quando um produto já foi consumido ou expirou e retorna ao fabricante, como pneus, pilhas e lâmpadas. Já a logística reversa de pós-venda é aquela em que há a devolução de produto defeituoso ou que não atendeu à expectativa do cliente ou ainda que terminou a sua vida útil e este material pode passar por um processo de reciclagem.

A aplicação de um processo de logística reversa requer um conjunto de estratégias e ações que envolvem um sistema de coleta, transporte, armazenamento e tratamento de resíduos pós-consumo, para que possa ser reutilizado na cadeia de produção.

Conforme Lacerda (2002, p.47) a logística reversa pode ser entendida como um processo de planejamento, implementação e controle do fluxo de matérias primas, estoque em processo e produtos acabados. Este fluxo parte do ponto de consumo até à sua origem para realizar o devido descarte ou gerar valor deste resíduo, conforme apresentado por meio de um fluxo logístico reverso na figura 3.1.

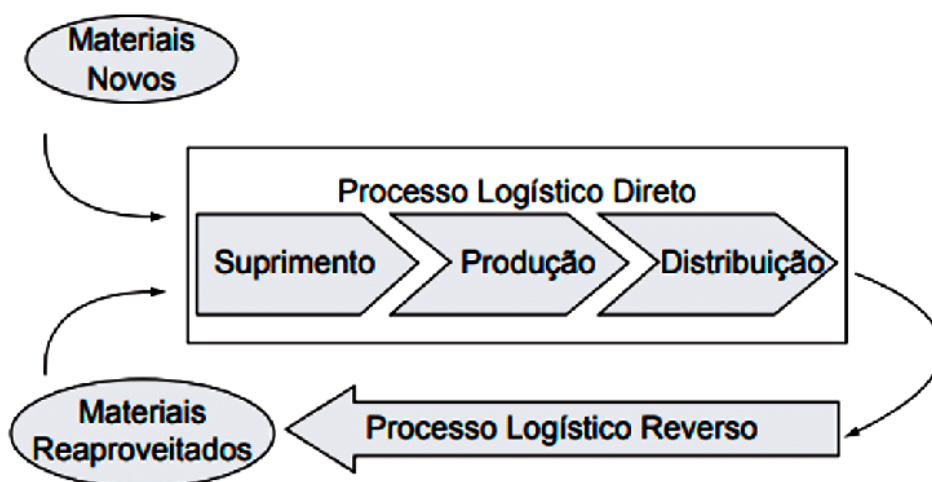


Figura 3.1 Processo logístico reverso. Fonte: LACERDA, 2002

Apesar do conceito de logística reversa possuir diversas definições, a logística reversa está atrelada ao conceito de ciclo de vida do produto, sendo esta estruturada em 4

fases: lançamento, crescimento, maturação e declínio, de tal forma que haja responsabilidade compartilhada por este ciclo de vida do produto.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos estabelecida em 2 de agosto de 2010, pela Lei nº 12.305, institui dois instrumentos que são a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida do produto e a logística reversa, sendo este um instrumento que visa à proteção ao meio-ambiente e à saúde pública, incentivando a reciclagem, aumentando a eficiência no uso de recursos naturais e promovendo a inovação de maneira sustentável. A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS, Lei nº 12.305/2010), apresenta o conceito de logística reversa como:

Instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada (PNRS, Lei nº 12.305/2010).

Existem diversos motivos para a implementação de processo de logística reversa nas organizações, conforme apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Motivos estratégicos para logística reversa

Motivo	Porcentagem de empresas
Aumento de competitividade	65,2
Limpeza de canal – estoques	33,4
Respeito às legislações	28,9
Revalorização econômica	27,5
Recuperação de ativos	26,5

Fonte: Adaptado de Leite (2003)

3.3 Sucata eletrônica

O resíduo eletrônico é constituído de equipamentos eletrônicos como computadores, celulares, eletrodomésticos, tablets e outros bens materiais que possam estar quebrados ou em obsolescência. De um modo geral, o resíduo eletrônico é composto majoritariamente por ferro, plástico e metais não ferrosos, conforme tabela 3.2, que demonstra a quantidade média de material da sucata eletrônica.

Tabela 3.2 Composição média de sucata eletrônica

Material	Quantidade (%)
Plásticos	20,6
Ferro/Aço	47,9
Metais não ferrosos	12,7
Vidro	5,4
Placas de circuito impresso	3,1
Madeira	2,6
Outros	7,7

Fonte: GERBASE e OLIVEIRA (2012)

Os equipamentos eletrônicos em sua composição, principalmente em placas e circuito impresso, contêm materiais que são valiosos no mercado. De acordo com Veit (2005), os metais compõem aproximadamente 29% da placa de circuito impresso e estes metais podem ser reutilizados e gerarem valor novamente. A composição da tabela 3.3 demonstra as quantidades médias de metais que podem ser encontradas em uma placa de circuito impresso.

Tabela 3.3 Composição média de metais em placa de circuito impresso

Metal	Quantidade média (%)
Cu	21,19
Sn	3,70
Al	1,79
Fe	1,31
Pb	1,20
Zn	0,17
Ni	0,17
Au	10 ppm

Fonte: Adaptado de Veit (2005)

Na constituição de resíduos eletrônicos estão presentes metais pesados, que caso sejam descartados em aterro, solo e de outras maneiras inadequadas, graves danos ao meio-ambiente e à saúde das pessoas podem ocorrer. O resíduo eletrônico, ao ser depositado em aterros não controlados, gera o risco de ocorrência de lixiviação de metais pesados para águas subterrâneas e superficiais e para o solo. O processo de incineração não é recomendado, devido à emissão de poluentes no ar.

Os metais pesados estão constituídos, especialmente, em placas de circuito impresso, por Chumbo, Mercúrio, Arsênio e Cádmio, que podem levar a desastres ambientais e colocar em risco a saúde das pessoas, caso sejam dispostos de maneira incorreta. A tabela 3.4 demonstra os riscos à saúde das pessoas ao serem expostas aos metais pesados.

Tabela 3.4 Elementos perigosos em componentes eletrônicos

Componentes eletrônicos	Componente perigoso	Riscos à saúde
Monitores de computador e televisores	Chumbo	Danos aos sistemas nervoso, circulatório e renal e dificuldade de aprendizagem em crianças
Placas de circuito de impressoras, transmissores e interruptores, baterias de produtos eletrônicos	Mercúrio	Danos permanentes ou fatais ao cérebro e rins
Interruptores, transmissores e placas de circuito	Arsênio	Danos pequenos à pele, pulmão e câncer linfático
Baterias de equipamentos eletrônicos e cabos, placas de circuito	Cádmio	Danos ao rim, pulmão e câncer de próstata

Fonte: Adaptado de Leite (2003)

A reciclagem do resíduo eletrônico, como um computador, deve iniciar por uma triagem, de tal forma, a garantir que o equipamento possa ser reaproveitado em projetos de inclusão digital em comunidades ou escolas, por exemplo.

O equipamento eletrônico ao fim de sua vida útil deve ser desmontado e os componentes eletrônicos separados. Seu volume deve ser reduzido por processos de compactação, para reduzir custos com transporte, e encaminhado para a reciclagem e reaproveitamento adequado. Na figura 3.2 é possível visualizar este fluxo do processo inicial de reciclagem, neste caso, para computadores.

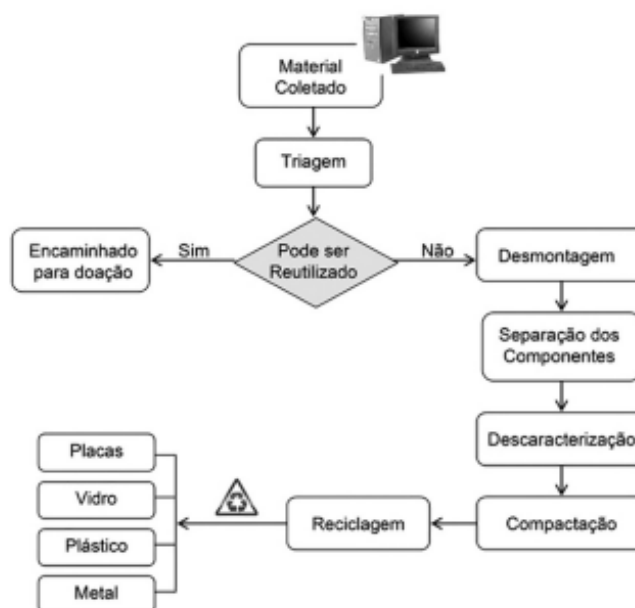


Figura 3.2 Fluxograma do processo inicial de reciclagem de computadores. Fonte: adaptado de (KANG e SCHOENUNG, 2005)

A sucata eletrônica ao passar por etapas de pré-tratamento de desmontagem, separação e compactação pode ser recuperada por diferentes processos metalúrgicos amplamente difundidos, conforme fluxo de etapas demonstrado na figura 3.3.

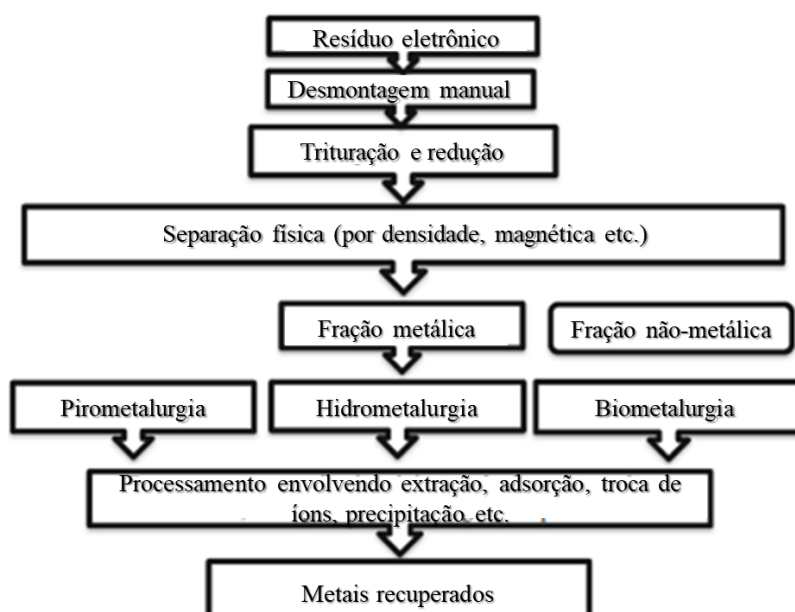


Figura 3.3 Fluxograma das etapas envolvidas em processos metalúrgicos de recuperação de metais. Fonte: PRIYA e HAIT (2017)

4 METODOLOGIA

Este estudo propõe a realização de uma revisão sistemática da literatura no processo de recuperação de sucata eletrônica.

Para a seleção da base de dados, foi utilizada a plataforma Web of Science. A definição das strings de busca com base no escopo do trabalho, utilizando os termos '*Electronic waste recycling*', '*Electronic waste recycling processes*', '*reverse logistics*', '*hydrometallurgy*' e '*electrometallurgy*'

Os critérios de seleção considerados foram:

- i) Considerar somente artigos de revisão;
- ii) Considerar somente artigos da língua inglesa;
- iii) Considerar artigos do período entre 2017 e 2023.

Os critérios definidos foram utilizados como forma de gerar uma base de artigos com número viável para leitura e análise. O critério de língua inglesa foi utilizado devido ao maior volume de trabalhos apresentados na plataforma Web of Science e o critério do período temporal foi utilizado como forma de identificar processos mais recentes e novas técnicas que a literatura possa apresentar.

A partir dos termos selecionados, foi construída uma *string* de busca e a cada pesquisa foi aplicado o filtro com base nos critérios de seleção determinados dos artigos disponíveis na base de dados *Web of Science*. Na tabela 4.1 são apresentadas as *strings*, filtros e número de artigos retornados.

Tabela 4.1 *Strings* de busca

Buscas	String de busca	Número de artigos
1ª Busca	(((ALL=(Electronic waste recycling processes)) OR ALL=(E-waste recycling technologies)) OR ALL=(E- waste recycling methods)) AND ALL=(hydrometallurgy) OR ALL=(electrometallurgy)	865
2ª busca	(((ALL=(Electronic waste recycling processes)) OR ALL=(E-waste recycling technologies)) OR ALL=(E- waste recycling methods)) AND ALL=(hydrometallurgy) OR ALL=(electrometallurgy) and Artigo (Tipos de documento)	65
3ª Busca	(((ALL=(Electronic waste recycling processes)) OR ALL=(E-waste recycling technologies)) OR ALL=(E- waste recycling methods)) AND ALL=(hydrometallurgy) OR ALL=(electrometallurgy) and Artigo (Tipos de documento) and Idioma (Língua Inglesa)	63

Buscas	String de busca	Número de artigos
4ª Busca	<p>(((ALL=(Electronic waste recycling processes)) OR ALL=(E-waste recycling technologies)) OR ALL=(E-waste recycling methods)) AND ALL=(hydrometallurgy)) OR ALL=(electrometallurgy) and Artigo (Tipos de documento) and Idioma (Língua Inglesa) and Período (2017 – 2023)</p>	50

Na primeira aplicação da *string* de busca selecionada, retornaram 865 trabalhos de pesquisa na base de dados da Web of Science. Utilizando o critério de artigos de revisão na string de pesquisa, foram encontrados 65 artigos. Com a aplicação do critério de idioma, neste caso, língua inglesa, restaram 63 artigos. Destes artigos foram selecionados dentro do período temporal determinado, de 2017 a 2023, retornando 50 artigos para leitura.

Para esta revisão sistemática da literatura são abordados em questões de pesquisa:

1. Quais os processos convencionais de recuperação de metais em sucata eletrônica?
2. Quais são os principais impactos ambientais das técnicas pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas?
3. O que a literatura apresenta de técnicas de hidrometalurgia?
4. O que existe de pesquisas para hidrometalurgia?
5. Quais são os principais elementos recuperados da sucata eletrônica?
6. Quais os principais aspectos do processo de biolixiviação?
7. Que tipo de microrganismo é utilizado na biometalurgia?
8. Quais são as técnicas biológicas para recuperação de metais?
9. O que a literatura nos diz em relação aos processos biológicos?
10. Como o resíduo eletrônico pode ser utilizado para produção de hidrogênio sustentável?

A partir destas questões propostas, este estudo as responderá, ao longo desta revisão, destacando alguns artigos selecionados que apresentaram temas relevantes para este trabalho, conforme a Tabela 4.2.

Tabela 4.2 Quadro comparativo dos principais artigos

Artigo	Autores	Resumo
<i>Water Splitting: From Electrode to Green Energy System</i>	LI et al (2020)	Aborda os avanços em diferentes células de energia verde para a cisão da água. Espera-se que esse conhecimento incentive o desenvolvimento de sistemas de energia verde para a geração de H2 livre de poluição, levando a uma produção de H2 sustentável e acessível.
<i>E-waste recycled materials as efficient catalysts for renewable energy technologies and better environmental sustainability</i>	SEIF, SALEM e ALLAM (2023)	Destaca o resíduo eletrônico como um desafio ambiental, mas também como uma oportunidade para a economia circular e o desenvolvimento de tecnologias renováveis. A recuperação e o uso de materiais de alto valor agregado (HAV) do resíduo eletrônico podem contribuir para a sustentabilidade e combater as mudanças climáticas.
<i>Recovery of precious metals from e-wastes through conventional and phytoremediation treatment methods: a review and prediction</i>	ZULKERNAIN et al (2023)	Explora o potencial de várias plantas que acumulam e toleram altos níveis de metais, como a <i>Brassica juncea</i> e a <i>Berkeheya coddii</i> , para a fitoextração de metais preciosos de resíduo eletrônico e fornece uma visão geral do estado atual da extração de metais preciosos, analisando as vantagens e desvantagens de diferentes tecnologias utilizadas para essa finalidade.

Artigo	Autores	Resumo
<i>Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching</i>	PRIYA e HAIT (2017)	Apresenta uma abordagem comparativa entre as técnicas metalúrgicas de recuperação de metais de resíduo eletrônico, como pirometalurgia, hidrometalurgia e com enfoque no processo de biolixiviação.
<i>A review on recovery processes of metals from E-waste: A green perspective</i>	DUTTA <i>et al</i> (2023)	Apresenta uma comparação dos diversos processos de recuperação de metais a partir de resíduos eletrônicos, juntamente com suas vantagens e limitações, com enfoque na abordagem de economia circular para o gerenciamento sustentável de resíduos eletrônicos, paralelamente com seus aspectos socioeconômicos e o crescimento econômico.
<i>Recovery technologies for indium, gallium, and germanium from end-of-life products (electronic waste) - A review</i>	ZHENG, BENEDETTI e HULLEBUSCH (2023)	Aborda a questão da escassez e sustentabilidade de elementos críticos para tecnologias avançadas (índium, gálio e germânio). Uma solução promissora é a recuperação destes elementos de resíduos eletrônicos. O texto destaca avanços recentes na recuperação desses elementos de fontes como telas LCDs descartadas, LEDs, painéis solares e fibras ópticas.

5 PROCESSOS METALÚRGICOS CONVENCIONAIS DE RECUPERAÇÃO DE METAIS DE SUCATA ELETRÔNICA

A recuperação de metais de sucata eletrônica é um processo importante para a preservação dos recursos naturais e para a redução da poluição. Os metais recuperados podem ser usados para fabricar novos produtos eletrônicos, o que reduz a necessidade de extração de novos metais da natureza. Além disso, a reciclagem de resíduos eletrônicos ajuda a reduzir a quantidade de resíduos que são enviados para aterros sanitários ou incineradores, o que evita a contaminação do meio ambiente.

Existem três principais processos metalúrgicos de recuperação de metais de sucata eletrônica:

- **Pirometalurgia:** Este processo envolve a fusão dos metais a altas temperaturas, para separá-los dos contaminantes. A sucata eletrônica é primeiro triturada e reduzida de tamanho, para facilitar a fusão. Em seguida, a sucata é fundida em um forno, onde os metais se fundem e se separam dos contaminantes. Os metais líquidos são então coletados e resfriados para formar lingotes.
- **Hidrometalurgia:** Este processo envolve a dissolução dos metais em soluções aquosas, para facilitar a sua separação. A sucata eletrônica é primeiro triturada e reduzida de tamanho, para facilitar a dissolução. Em seguida, a sucata é dissolvida em uma solução aquosa, onde os metais se dissolvem e se separam dos contaminantes. Os metais dissolvidos são então recuperados por métodos como eletrodeposição ou precipitação química.
- **Biometalurgia:** Este processo envolve o uso de microrganismos para extrair os metais dos resíduos eletrônicos. A sucata eletrônica é primeiro triturada e reduzida de tamanho, para facilitar a ação dos microrganismos. Em seguida, a sucata é exposta a microrganismos que podem dissolver ou precipitar os metais. Os metais dissolvidos ou precipitados são então recuperados.

5.1 Pirometalurgia

A pirometalurgia é uma técnica que utiliza altas temperaturas para recuperar metais valiosos de resíduos eletrônicos. Este processo envolve o tratamento térmico do resíduo eletrônico por meio de combustão, fusão, escória, sinterização, fusão a plasma e outras reações sólido-líquido-gás em altas temperaturas, para recuperar os metais desejados.

O processo ocorre em duas etapas:

- Pré-combustão: os resíduos eletrônicos são submetidos a uma temperatura de 600 a 800 °C para remover materiais combustíveis, como plástico e papel.
- Pós-combustão: os resíduos remanescentes são então submetidos a uma temperatura de 900 a 1.200 °C para fundir os metais.

As etapas do processo pirometalúrgico para extração de metais a partir do resíduo eletrônico envolvem processos de compactação, separação física, implementação da técnica de pirometalurgia, cuja temperatura pode variar entre 300°C e 3000°C dependendo do metal de interesse, conforme estão demonstradas na figura 5.1.

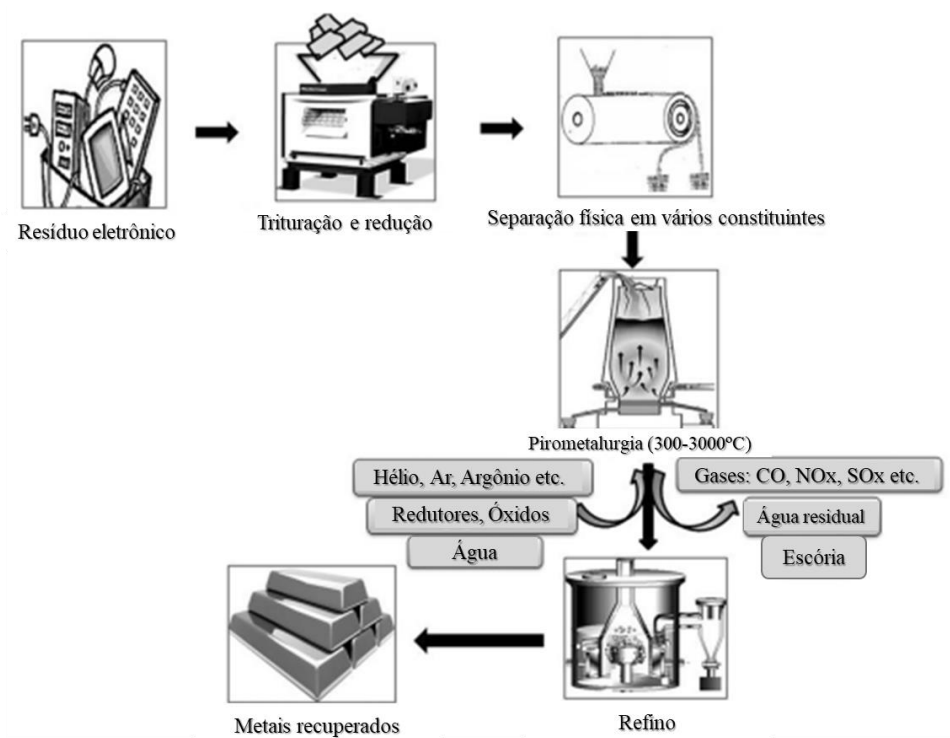


Figura 5.1 Esquema das etapas envolvidas do processo de Pirometalurgia. Fonte: PRIYA e HAIT (2017)

A pirometalurgia é um método eficaz para a recuperação de metais puros, como cobre, ouro, prata e ferro. No entanto, também tem algumas desvantagens. É um processo intensivo em energia, pois requer altas temperaturas para fundir os metais, o que aumenta o consumo de energia, a geração de gases tóxicos pela combustão dos resíduos eletrônicos, como dioxinas e furanos e, pela liberação de metais pesados no meio ambiente, pode causar danos ambientais.

Para reduzir os impactos ambientais da pirometalurgia, é importante tratar os gases tóxicos liberados durante o processo. Isso pode ser feito usando filtros ou outros métodos de controle de poluição. A tabela 5.1 apresenta os tipos de compostos gasosos emitidos oriundos do processo de pirometalurgia.

Tabela 5.1 Emissões gasosas do processo de pirometalurgia

Composto	% Emissão (volume/massa)	Referências
Metano	0,06-15,40	Chiang and Lin 2014
Dióxido de carbono	0,43-31,40	Lu et al. 2012; Wang et al. 2013
1,2-Butadieno	0,19	
Acetileno	0,36-1,20	
Propeno	0,49	
Furano	0,65	
Etano	0,70-5,61	
2-Butanona	0,76	
Acetato de etila	1,5	
Propano	1,92	
Furano, 2-metil	3,09	
Benzeno	4,62	
Etileno	6,13	
Propeno	9,2	

Composto	% Emissão (volume/massa)	Referências
Hidrogênio	19,1	
Monóxido de carbono	32	
1-Buteno	34,96	
Brometo de hidrogênio (HBr)	35	Terakado et al. 2013
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs)	35	Chien et al. 2009

Fonte: Adaptado de PRIYA e HAIT (2017)

5.2 Hidrometalurgia

Como o processo pirometalúrgico na extração de metais de REEE apresenta obstáculos significativos, especialmente, as possíveis emissões de metais tóxicos volatilizados, principalmente de metais com baixo ponto de fusão como cobre, cádmio e chumbo, somadas aos altos custos de investimento e operação, tornam a aplicação posterior de um processo hidrometalúrgico uma alternativa promissora para o tratamento e recuperação de metais de REEE.

Em um processo hidrometalúrgico convencional, a lixiviação é a etapa inicial para recuperação de metais. Este processo utiliza lixiviantes químicos, dissolvendo as frações metálicas do resíduo eletrônico. Os lixiviantes, de um modo geral, são soluções ácidas ou alcalinas, que solubilizam a matriz sólida liberando os metais em solução.

Contudo, como os metais no resíduo eletrônico frequentemente estão embutidos em matrizes de polímero ou cerâmica, uma etapa de fragmentação mecânica para expor as partículas metálicas encapsuladas pode ser necessária para melhorar a extração e posteriormente tratados com soluções de lixiviação (Cui e Forssberg, 2003; Cui e Zhang, 2008; Zhang e Forssberg, 1997).

A figura 5.2 apresenta o esquema representativo do processo de Hidrometalurgia para a recuperação de metais.

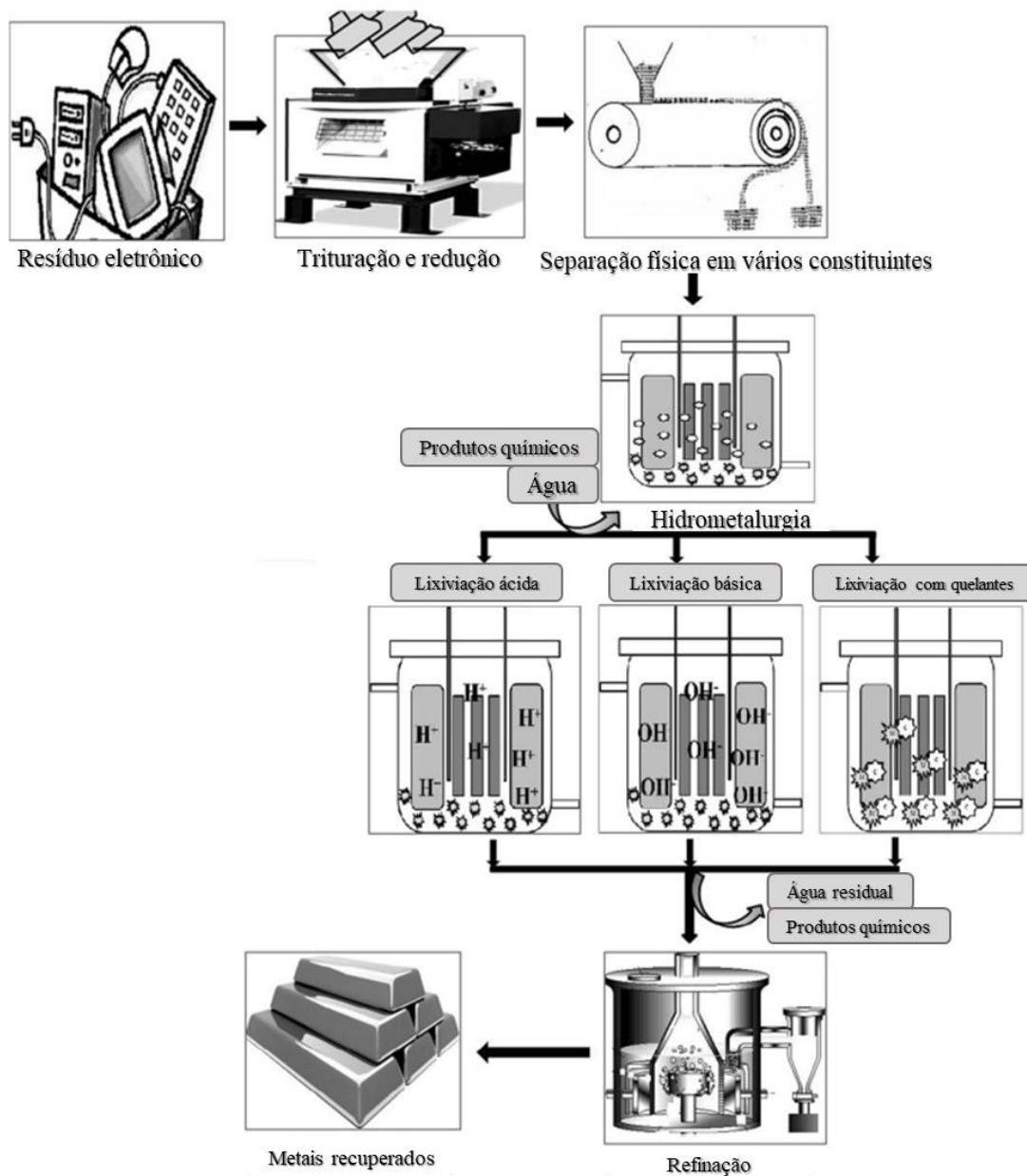


Figura 5.2 Esquema das etapas envolvidas do processo de Hidrometalurgia. Fonte: PRIYA e HAIT (2017)

Cada elemento pode exigir diferentes técnicas de lixiviação para a recuperação do metal desejado. A tabela 5.2 demonstra possíveis técnicas e princípios de lixiviação e sua eficiência de recuperação do metal.

Tabela 5.2 Técnicas de recuperação

Técnica de recuperação	Princípios	Solução de lixiviação	Eficiência de Recuperação	Referências
Extração com solvente	Separação de elementos alvo constituintes em resíduos por dissolução em uma solução líquida com um solvente orgânico.	H ₂ SO ₄ : 1000 mL, 12 h, 25 °C	>99% Cu 90% Mo 75% U 65% V	SMOLINSKI, WAWSZCZAK, DEPTULA et al (2017)
		Água régia	96% Au	KUBOTA, KONO, YOSHIDA et al (2019)
		H ₂ SO ₄ , NaBr (3M): 1h, 70°C, agitação a 500 rpm	>95% Au	DHANUNJAYA, SINGH, MORRISON, LOVE (2021)
		HCl, HClO ₄ , HNO ₃ : 1-11 mol/L,	99% Sc	ISMAIL, AZIZ, YUNUS et al (2019)
		Soluções de AlCl ₃ (20-30 g/L)	Sc	SALMAN, JUZSAKOVA, MOHSEN et al (2022)
		60% Cyanex 272 + 40% Cyanex 923	98% Sc	SALMAN, JUZSAKOVA, MOHSEN et al 2022
		H ₂ SO ₄ + H ₂ O ₂	60% Al 94% Cu 76% Zn 50% Ni	CORREA, SILVAS, ALIPRANDINI et al (2018)
Eletrodeposição	Recuperação de metais alvos através da redução	HNO ₃ (69%)	>40% Au, Pb, Cu	PAUL e LIM 2005

Técnica de recuperação	Princípios	Solução de lixiviação	Eficiência de Recuperação	Referências
	eletroquímica de íons metálicos de um eletrólito.	NaCl (100 mM)	97% Cu 65% Eu	O'CONNOR, COULTHARD e PLATA (2018)
Troca iônica	Uso de resinas quelantes para gerar complexos metálicos, permitindo a recuperação seletiva do íon ou metal desejado.	H ₂ SO ₄	69% Cu 13% Ni	GOC, KLUCZKA, BENKE G et al (2021); BOTELHO, VICENTE, ESPINOSA, TENÓRIO (2019)
		HNO ₃ (65%), H ₂ O ₂ (30%)	99% Pt 99% Pd 80% Rh 99% Au 99% Cu 81% Zn	GOC, KLUCZKA, BENKE et al (2021); BOTELHO, VICENTE, ESPINOSA, TENÓRIO (2019)
Adsorção	Adsorção seletiva de misturas binárias e complexas e recuperação em alta pureza usando biossorventes, como carvão ativado, adsorventes derivados de quitosana e sericina de seda para purificar os metais alvos.	- HCl (10 wt%)	63% Cu >90% Pd, Pt, Ru	TAKALUOMA, PIKKARAINEN e KEMPPAINEN (2018) TORRINHA, BACELO, SANTOS et al (2020)
		HCl (0,2–3,7 mol.L ⁻¹); Água régia (0,3–4,2 mol.L ⁻¹)	>99% Au 11% Ni 10% Pd	GRAD, CIOPEC, NEGREA et al (2021)

Técnica de recuperação	Princípios	Solução de lixiviação	Eficiência de Recuperação	Referências
			<3% Cu, Fe, Zn	

Fonte: Adaptado de ZULKERNAIN et al (2023)

Embora a viabilidade técnica do método hidrometalúrgico para recuperação de metais do resíduo eletrônico seja comprovada, a água residuária gerada durante o processo é altamente perigosa, difícil de reciclar e representa uma grande limitação (Norgate et al. 2007). Pesquisadores propuseram diversas melhorias e modificações no processo hidrometalúrgico existente.

Melhorias para superar as limitações:

- Plasma térmico combinado com lixiviação ácida: Rath et al. (2012) desenvolveram esta técnica que oferece baixa produção de efluentes, alto grau de separação de escória e metal, e menor tempo de processamento.
- Tratamento térmico e ácido combinados: Este método proposto acelera e melhora a dissolução e recuperação de ouro (Chmielewski et al. 1997).
- Recuperação de cobre à temperatura ambiente: Yang et al. (2011) estudaram um processo verde para recuperar cobre de partículas trituradas de placas de circuito impresso (PCBs) descartados usando soluções de ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio.
- Recuperação seletiva de estanho: Jha et al. (2012) descreveram um método seguro baseado em produtos químicos orgânicos para recuperar seletivamente estanho de PCBs multicamadas de computadores pessoais contendo solda.

6 BIOLIXIVIAÇÃO E PROCESSOS BIOLÓGICOS PARA RECUPERAÇÃO DE METAIS

A recuperação de metais a partir de processos biológicos, também conhecida como biometalurgia, é um campo que utiliza microrganismos para extrair metais de resíduos sólidos, como resíduos eletrônicos, mineração e águas residuais.

Os microrganismos podem ser usados para recuperar diversos metais, incluindo metais preciosos, metais base e metais pesados, por meio de uma série de processos biológicos.

6.1 Biometalurgia

A Biometalurgia, também associada à biolixiviação, é um conceito aplicado para a recuperação de metais de forma ecológica e energeticamente eficiente, de tal forma, que ela explora a capacidade de lixiviação dos microrganismos (biolixivantes) para converter metais em formas solúveis e extraíveis da solução (Brierley e Brierley, 2001; Krebs et al., 1997).

A biolixiviação envolve diversos grupos de microrganismos, como procariontes quimiolitotróficos, bactérias heterotróficas e fungos. Estes microrganismos têm sido amplamente utilizados para extrair metais valiosos, como cobalto, níquel, manganês e cobre, de minérios e outras fontes secundárias.

As técnicas mais utilizadas para a aplicação desse processo são constituídas pela biolixiviação em pilhas, em montes e em tanques agitados. A biolixiviação em pilhas se utiliza da ação natural de bactérias contidas na pilha de minérios, além da adição de consórcios microbianos que aceleram a solubilização dos metais. A biolixiviação em montes se baseia no mesmo princípio, mas a diferença é que utiliza depósitos existentes de rejeitos minerais, que de um modo geral, o teor de metal é baixo. A biolixiviação em tanques agitados, tem por princípio a interação entre agentes oxidantes e a superfície natural, no qual uma polpa é formada pelo agente lixivante e a amostra mineral é agitada de maneira contínua, a fim de evitar uma sedimentação dos sólidos.

Diversos aspectos podem influenciar o processo de biolixiviação, como as questões físico-químicas, aspectos microbiológicos e minerais, conforme demonstrado na Figura 6.1.

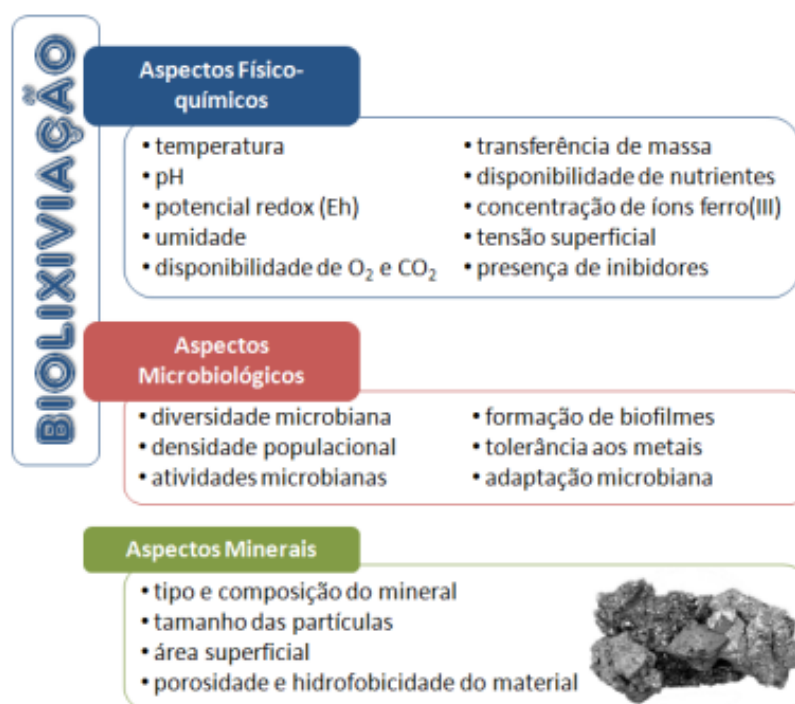


Figura 6.1 Aspectos envolvidos na biolixiviação. Fonte: GEISE (2017)

Os microrganismos que se destacam para a aplicação de processos de biolixiviação são capazes de oxidar metais a partir de substratos, como bactérias quimiolitotóxicas, fungos, microrganismos secretores de ácido e microbactérias heterótrofas.

Na tabela 6.1 estão demonstrados os principais microrganismos utilizados no processo de biolixiviação para recuperação de metais.

Tabela 6.1 Micróbios utilizados na biolixiviação

Metal	Micróbios	Substrato	Condição	Eficiência	Referência
Ouro	<u>Etapa 1:</u> Acidithiobacillus ferrivorans e Acidithiobacillus thiooxidans	Placa de circuito impresso descartada	Temperatura: 30°C pH: 8,0 a 9,2	44%	IŞILDAR, van de VOSENBER G, RENE et al (2016)
	<u>Etapa 2:</u> Pseudomonas fluorescens e Pseudomonas putida				
Ouro	Chromobacterium violaceum e Pseudomonas fuorescens	Resíduo eletrônico	Temperatura: 30°C pH: 7,2 a 9	69%	BRANDL, LEHMANN, FARAMARZI e MARTINELLI (2008)
Ouro	Bacillus megaterium	Placas de circuito impresso de celular	pH: 10 Densidade da polpa: 8,13 g/L Glicina: 10 g/L	65 g Au/ton	ARSHADI, MOUSAVI e RASOULNIA (2016)
Ouro	Chromobacterium violaceum e Pseudomonas aeruginosa	Resíduo de placa de circuito impresso	Temperatura: 30°C pH: 7,2 Densidade da polpa: 1% Tempo de lixiviação: 7 dias 150 rpm Densidade óptica: 1,0 a 660 nm 5% inóculo	73%	PRADHAN E KUMAR (2012)

Metal	Micróbios	Substrato	Condição	Eficiência	Referência
Ouro	Chromobacterium violaceum	Material de resíduo eletrônico	Temperatura: 30°C pH: 9,5 Densidade da polpa: 0,5% 170 rpm	22,5%	NATARAJAN e TING (2014)
Ouro	Acidithiobacillus ferrooxidans	Resíduo eletrônico	Temperatura: 30°C pH: 2 Densidade da polpa: 1% 150 rpm	39,49%	NATARAJAN, TAY, YEW e TING (2015)
Ouro	Genetically engineered Chromobacterium violaceum (pBAD)	Resíduo eletrônico	Temperatura: 30°C Densidade da polpa: 0,5% Pré-tratado com ácido nítrico 6M 170 rpm	30%	NATARAJAN e TING (2015)
Ouro	Chromobacterium violaceum	Resíduo de placa de circuito impresso	pH: 11 Densidade da polpa: 1,5% $4,0 \times 10^{-3}$ mol/L de $MgSO_4$ 8 dias	11%	TRAN, LEE, PANDEY et al (2011)
Ouro	Chromobacterium violaceum	Resíduo de placa de circuito impresso	pH: 8–9 NaCl, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	70%	LI, LIANG e MA (2014)
Ouro	Pseudomonas chlororaphis	Resíduo de placa de circuito impresso	pH: 7	8,2%	RUAN, ZHU, QIAN e HU (2014)

Metal	Micróbios	Substrato	Condição	Eficiência	Referência
Prata	Chromobacterium violaceum e Pseudomonas aeruginosa	Resíduo de placa de circuito impresso	Temperatura: 30°C pH: 7,2 150 rpm O.D.=1,0 a 660 nm Inoculo: 5% Densidade da polpa: 1,5% Tempo de lixiviação: 7 dias	8%	PRADHAN e KUMAR (2012)
Prata	Pseudomonas chlororaphis	Resíduo de placa de circuito impresso	pH: 7	12,1%	RUAN, ZHU, QIAN e HU (2014)
Cobre	Lentinus edodes Pleurotus forida Ganoderma lucidum Aspergillus niger Trametes versicolor Streptomyces spp. Pseudomonas spp.	Resíduo de placa de circuito impresso	Biomassa seca: 1,0 g 15,0 mL de água régia (35% HCl e 70% HNO ₃ em proporção 3:1) Temperatura: 70°C	10,5% a 18,0%	KAUR, SHARMA e ALBARAKAT Y et al (2022)
Ferro	Lentinus edodes Pleurotus forida Ganoderma lucidum Aspergillus niger Trametes versicolor Streptomyces spp. Pseudomonas spp	Resíduo de placa de circuito impresso	Biomassa seca: 1,0 g 15,0 mL de água régia (35% HCl e 70% HNO ₃ em proporção 3:1) Temperatura: 70°C	9,0% a 13,6%	KAUR, SHARMA e ALBARAKAT Y et al (2022)

Fonte: Adaptado de ZULKERNAIN et al (2023)

A biolixiviação é influenciada por fatores bióticos e abióticos, nos quais afetam a atividade dos microrganismos que resultam em impactos no processo de extração do metal. Os fatores bióticos são aqueles relacionados às características e tipo de microrganismo. Já os fatores abióticos são aqueles relacionados ao ambiente de crescimento, pH, acesso a oxigênio, tempo de incubação e composição do meio.

Entre as principais vantagens do processo de Biometalurgia se destacam o baixo custo de operação, menor geração de efluentes químicos e consumo de energia, compatibilidade ambiental e uso de tecnologia simples para realizar a extração de metais.

6.2 Processos biológicos

Os métodos biológicos de recuperação de metais do resíduo eletrônico são a biossorção, fitorremediação e sistema bioeletroquímico (BES).

A figura 6.2 demonstra os diferentes métodos biometalúrgicos para recuperação de metais a partir do resíduo eletrônico.

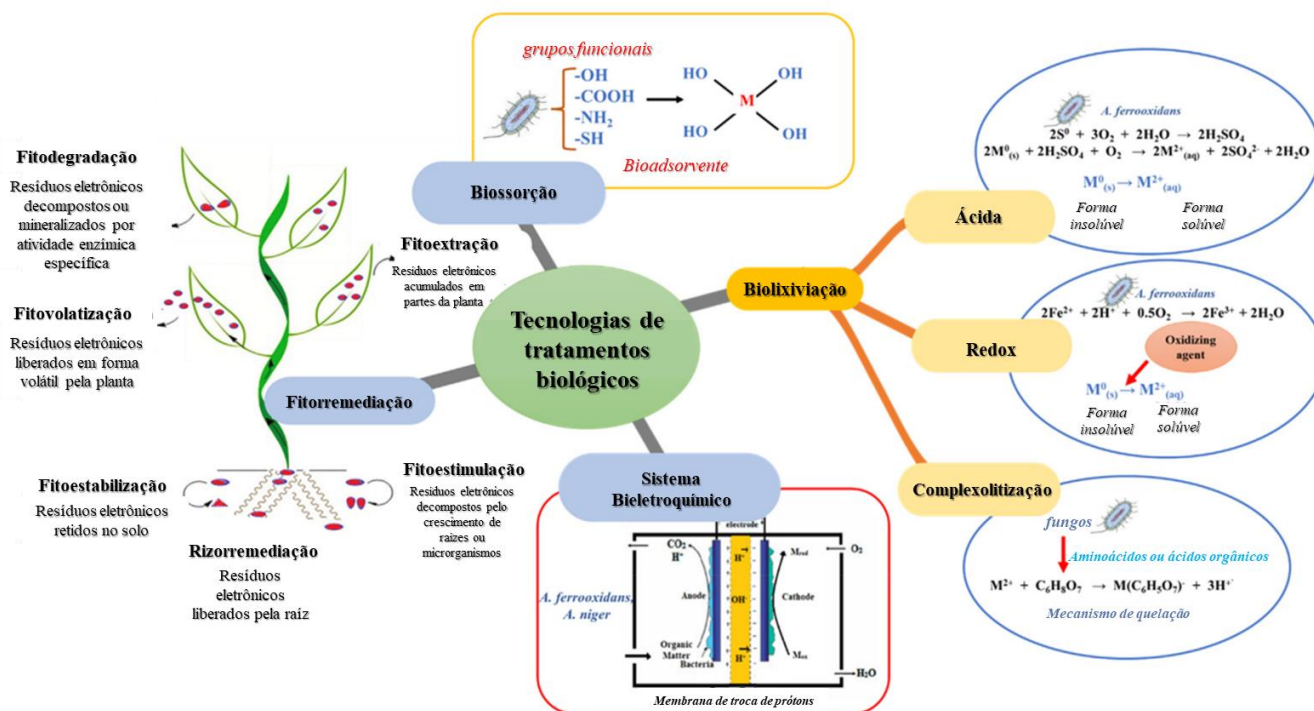


Figura 6.2 Esquema representativo de técnicas biometalúrgicas. Fonte: DUTTA *et al* (2023)

As principais vantagens dos métodos biológicos para extração e recuperação de metais a partir de resíduo eletrônico incluem: economia, tendo em vista que não necessitam de uso de produtos químicos ou energia em grandes quantidades; sustentabilidade do processo, pelo fato de não gerar resíduos tóxicos; eficiência do seu processo.

Entretanto os processos biológicos apresentam seus desafios, que incluem o tempo de incubação, por ser mais longo que processos químicos ou físicos, e a interferência de metais base, como Ferro, que podem interferir na recuperação de metais preciosos, como Ouro.

6.2.1 Biossorção

A biossorção é o processo que consiste na adsorção de metais pesados que ocorre devido à sua afinidade com materiais de origem biológica. A biomassa do microrganismo tem a capacidade de agir como um depósito para a recuperação de metais, pela sua capacidade de se ligar aos metais na parede celular, acumulá-los dentro da célula e precipitar os metais dentro e ao redor das células. A biossorção é um método alternativo que apresenta grande eficácia, quando comparado a tratamentos convencionais difundidos, devido à retenção dos metais pelos microrganismos, promovendo uma autorregeneração do efluente (Pietrobelli *et al.*, 2009)

Durante o processo de biossorção, grupos funcionais como OH, COOH e NH₂ se ligam aos íons metálicos, facilitando a biossorção (Choi e Yun, 2006). Metais preciosos como o ouro já foram extraídos utilizando o método de biossorção com microrganismos como *Arthrobacter tumescens* IAM 1447, *Streptomyces erythraeus*, *Spirulina platensis* e *Thiobacillus novellus* IFO 12443 (Tsuruta, 2004).

Na literatura é apresentada uma combinação híbrida de biossorção e lixiviação química (Sheel e Pant, 2018), no qual *Lactobacillus acidophilus* foi usado para a biossorção, enquanto o tiosulfato de amônio foi usado como agente de lixiviação química. Essa combinação foi utilizada para extrair ouro de placas de circuito impresso descartadas, no qual apresentou uma eficiência de recuperação de 85%.

6.2.2 Fitorremediação

A fitorremediação é um método utilizado para extrair metais de solos contaminados pela reciclagem do resíduo eletrônico e prevenir a entrada de metais pesados nos ecossistemas aquáticos e terrestres (Yan *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2010).

Existem diferentes mecanismos de fitorremediação, por exemplo, fitodegradação, fitoestimulação, fitovolatilização, fitoestabilização, fitoextração e rizomaremediação.

Na literatura, Ghazaryan *et al.* (2019) relataram que os microrganismos *Achillea millefolium*, *Phleum pratense* e *Thymus kotschyanus*, e utilizando o mecanismo de fitoestabilização, demonstraram maior eficiência na remediação de cobre de locais

contaminado. Luo *et al* (2018) projetaram um sistema de fitorremediação utilizando *Eucalyptus globulus* para remediar vários metais em locais contaminados por resíduo eletrônico. A capacidade de remediação de metais por *Eucalyptus globulus* foi aumentada usando tratamentos com EDTA (Luo et al., 2017).

6.2.3 Sistema bioeletroquímico (BES)

O sistema bioeletroquímico é um sistema que utiliza micróbios para gerar eletricidade a partir de matéria orgânica. O processo ocorre sob condições anaeróbicas, nos quais os elétrons são coletados da matéria orgânica em efluentes, gerando eletricidade, além de outros benefícios, como a remoção de substâncias nocivas da água ou do solo e na produção de combustíveis de fontes renováveis.

No contexto da gestão de resíduos eletrônicos, os BES oferecem a possibilidade de lixiviação redutiva, ou seja, componentes eletrônicos ricos em metais críticos, como o cobalto, podem ser adsorvidos ao cátodo de uma célula a combustível microbiana. Durante a operação de uma célula a combustível microbiana, os elétrons fluem do ânodo para o cátodo, fazendo com que o cobalto adsorvido seja lixiviado na solução.

6.3 Aspectos bioeconômicos

Os aspectos bioeconômicos englobam ganhos e benefícios aos negócios, à sociedade e ao meio-ambiente com o uso de recursos biológicos renováveis do solo e da água de maneira adequada.

A economia circular é um conceito designado para um ciclo fechado e que tem por objetivo o uso máximo de produtos e garantir a implementação dos 4 R's (Reduzir, Reusar, Reciclar e Recuperar). O conceito de economia circular está representado pela Figura 6.3, no qual demonstra as etapas do fluxo que reforça o uso máximo de recursos existentes com a menor perda de material.

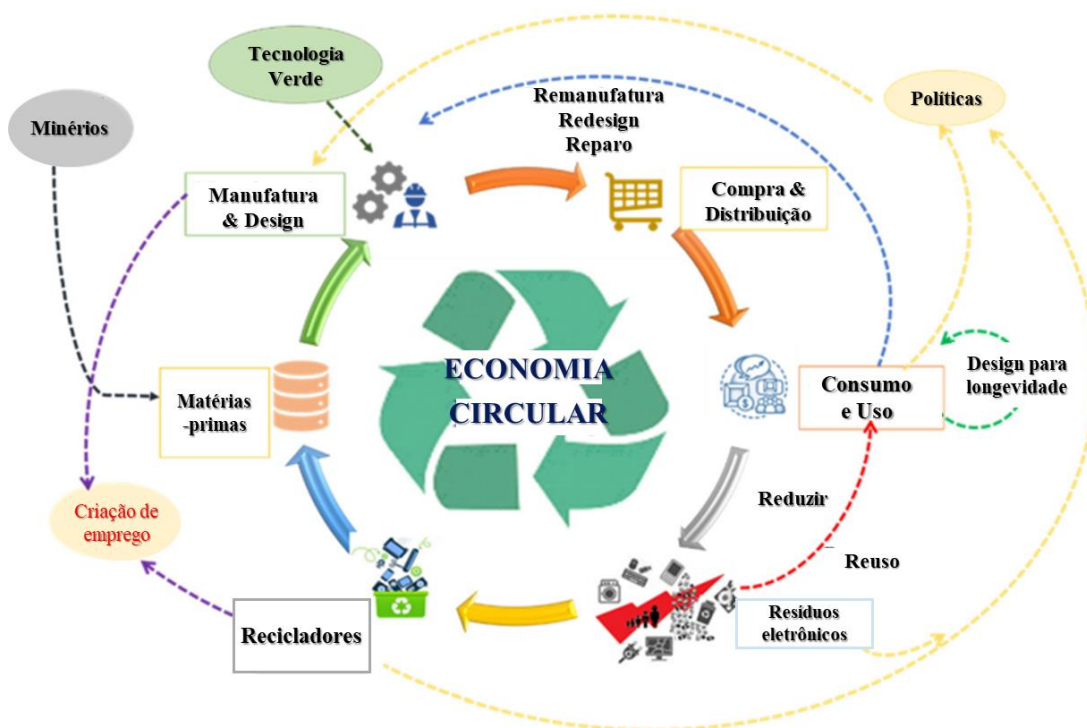


Figura 6.3 Economia circular e gestão de resíduo eletrônico. Fonte: DUTTA *et al* (2023)

A gestão de resíduos em conjunto com a aplicação de economia circular tem papel de grande relevância na economia, pois esta abordagem reduz o desperdício e incentiva a recuperação de materiais valiosos com produtos possuindo maior ciclo de vida.

As principais vantagens da combinação dos conceitos no segmento de resíduo eletrônico são a manutenção da demanda e o fornecimento de metais preciosos e raros para a fabricação de produtos, o estímulo à economia verde, a promoção da integração do setor formal e informal de reciclagem e a resolução de problemas relacionados à escassez de recursos críticos.

Além disso, a economia do país depende das atividades relacionadas à produção, consumo, comércio e serviços, em especial a demanda por metal que movimenta de maneira intensa. De acordo com Navazo *et al* (2014), em uma tonelada de resíduo eletrônico podem ser recuperados 0,347 kg de ouro, 0,15 kg de paládio, 3,63 kg de prata, 128 kg de cobre, 15 kg de níquel, 6 kg chumbo, 1 kg de antimônio e 10 kg de estanho. Esta quantidade de metais pode gerar aproximadamente USD 25.192 por tonelada em

receitas. De acordo com YKEN *et al* (2021) com base na geração de resíduos eletrônicos gerados em 2019, seria possível recuperar metais no valor de US\$ 57 bilhões, aproximadamente, conforme demonstrado na Tabela 6.2.

Tabela 6.2 Valor potencial dos metais encontrados em resíduos eletrônicos

Metal	Quantidade (kt)	Valor Potencial (US\$ Mi)
Ag	1,2	579
Al	3.046	6.061
Au	0,2	9.481
Bi	0,1	1,3
Co	13	1.036
Cu	1.808	10.960
Fe	20.466	24.645
Ge	0,01	0,4
In	0,2	17
Ir	0,001	5
Os	0,01	108
Pd	0,1	3.532
Pt	0,002	71
Rh	0,01	320
Ru	0,0003	3
Sb	76	644
Total		57.463,7

Fonte: YKEN *et al* (2021)

7 APLICAÇÃO DE MATERIAIS RECUPERADOS EM TECNOLOGIAS VERDES E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

Os resíduos eletrônicos são compostos por uma variedade de materiais, incluindo metais, plásticos, vidros e componentes eletrônicos. Alguns desses materiais podem ser reciclados, mas outros são descartados em aterros sanitários ou incineradores, onde podem liberar poluentes tóxicos.

No entanto, os resíduos eletrônicos também podem ser uma fonte de energia e armazenamento. Alguns dos materiais que compõem esses resíduos, como o lítio, o cobalto e o níquel, podem ser usados para produzir hidrogênio ou para armazenar energia.

7.1 Produção de Hidrogênio

Os metais extraídos de resíduo eletrônico podem ser utilizados como catalisadores para a geração de hidrogênio através da decomposição da água em determinadas condições. A reciclagem de forma sustentável minimiza o consumo de energia utilizado na produção de matérias-primas e aborda as preocupações ambientais associadas aos materiais perigosos presentes no fluxo de resíduos eletrônicos (Das et al., 2019). O consumo de energia é um dos principais fatores contribuintes para a emissão de gases de efeito estufa, com as emissões de CO₂ provenientes da combustão de combustíveis fósseis atingindo 33,1 bilhões de toneladas em 2018 (Zedalis, 2017).

O hidrogênio não produz gases de efeito estufa quando queimado, apenas vapor de água, o que poderia contribuir significativamente para a descarbonização do setor energético.

Os métodos atuais de produção de hidrogênio possuem dependência em aproximadamente 96% de combustíveis fósseis e apenas 4% provêm de fontes renováveis. Além disso, 96% do hidrogênio obtido do gás natural, petróleo e carvão resultam em uma emissão anual de 560 milhões de toneladas de CO₂, representando 1,7% das emissões globais (Zedalis, 2017).

7.2 Tecnologias verdes para produção de hidrogênio

A eletrólise da água é uma técnica utilizada para produção de hidrogênio puro e para que isso ocorra, ela requer uma fonte de energia externa para dividir a molécula de água. De acordo com Wang, Li e Domen (2019), uma alternativa é capturar e armazenar energia renovável do ambiente, como energia eólica, solar ou térmica, para alimentar a eletrólise e eliminar ou reduzir a necessidade de uma fonte externa de energia.

A energia solar tem o potencial de reduzir o consumo total de energia necessário para a produção de hidrogênio, por exemplo, o consumo de energia externa pode ser minimizado usando células solares que convertem diretamente a luz solar em eletricidade, sem a necessidade de uma fonte externa. Além disso, a luz solar pode ser utilizada como fonte de calor, de forma a gerar a energia necessária para o processo de hidrólise usando dispositivos termoelétricos.

A produção de hidrogênio via eletrólise da água pode ser conduzida por vários dispositivos, como células solares, fotoeletrodos, dispositivos termoelétricos e pirolétricos, conforme ilustrado na Figura 7.1. (Li et al., 2020).



Figura 7.1 Esquema representativo de sistemas via eletrólise. Fonte: Li *et al.* (2020)

7.3 O uso de materiais recuperados de resíduo eletrônico para armazenamento de energia

A tabela 7.1 demonstra uma comparação de materiais recuperados a partir de resíduo eletrônico para a produção de dispositivos de armazenamento de energia, como capacitores e baterias recarregáveis.

Tabela 7.1 Eletrocatalisadores recuperados para capacitores

Resíduo eletrônico	Material recuperado	Método de preparação	Morfologia	Estabilizada (%) ciclos	Referência
Baterias Zn-C	MnO ₂	Lixiviação e eletroobtenção	Nano-flor	88% 900	(Gomaa et al. 2014)
	MnO ₂	Conversão por voltametria cíclica	Nano-flor	93% 1650	(Gomaa et al. 2017)
	MnO ₂	Tratamento térmico	Forma esférica e cúbica	80% 2100	(Farzana et al., 2019)
	MnO ₂ /rGO	Conversão por voltametria cíclica	Nano-flor/nanofolhas	95% 2000	(Gomaa et al., 2018)
Cátodo de bateria alcalina gasta	MnO ₂	Eletrodeposição	Aglomerado de esferas	87,2% 5000	(Thomas et al. 2019)
Baterias de lítio (LIB)	Co ₃ O ₄	Precipitação química e tratamento térmico	Cristais aglomerados	-	(E.M.S. Barbieri, et al., 2014)
	Co ₃ O ₄	Eletrodeposição magnética	Nanoestrutura hierárquica bem definida	96% 5000	(Eslam et al. 2018)
	Óxido de grafeno reduzido (rGO)	Método químico simples	Morfologia intrínseca de "pele falsa"	-	(Subramaniaet al. 2018)
	LiCoO ₂	Precipitação química	Estrutura cristalina	86,9% 4000	(Xu et al., 2015)
	MnCo ₂ O ₄	Precipitação química	-	94,4% 8000	(Natarajan et al., 2022)

Resíduo eletrônico	Material recuperado	Método de preparação	Morfologia	Estabilidade (%) ciclos	Referência
	Li-Ni-Mn-Co hidróxido	Eletrodeposição	Estrutura semelhante a nano-cabelos	90% 10.000	(Mesbah et al., 2020)
Placa de circuito impresso	CuO	Método químico simples	-	93,1% 3000	(Rajkumar et al., 2022)
Cartão SIM (chip de celular)	CuO	Método químico simples	Estrutura semelhante a couve-flor	95,3% 5000	(Rajkumar et al., 2020)
Cartucho	Carbono Derivado/Fe ₃ O ₄	Tratamento térmico	Esférico	97% 5000	(Kaipannan et al., 2019)

Fonte: Adaptado de SEIF *et al* (2023)

8 ANÁLISE DA REVISÃO DA LITERATURA

Esta revisão da literatura permitiu analisar e avaliar os processos relacionados a recuperação de metais a partir de resíduos eletrônicos por meio de artigos de revisão, conforme critérios estabelecidos. Com a *'string'* de busca aplicada na base de dados, identificou-se que existem poucos artigos de revisão, dentro do período temporal definido, em português, conforme é possível avaliar na aplicação da 3ª busca, no qual foi aplicado o critério de língua inglesa, em que apenas 2 artigos foram excluídos da busca, sendo um em português e outro em mandarim.

Entre os 50 artigos avaliados, 16 artigos são de comparações entre os processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biometalúrgicos. Neste universo de 50 de trabalhos, 12 são enfatizados em processos de hidrometalurgia, enquanto 15 em processos de biometalurgia. Já para processos pirometalúrgicos, não foram identificados nenhum trabalho enfatizado nesta técnica, apenas a nível de comparação. Ainda, foram identificados 7 trabalhos com outros tipos de enfoques, como legislações e melhorias de processos de separação e reciclagem de resíduos eletrônicos.

Os principais processos de recuperação de metais a partir da sucata eletrônica identificados nos artigos de revisão, conforme os critérios, foram a pirometalurgia e hidrometalurgia, que apresentam taxas de eficiência de recuperação de metais de alto valor agregado mais elevadas, quando comparadas com processos de biolixiviação. Entretanto, os processos de pirometalurgia e hidrometalurgia apresentam impactos ambientais relevantes. Um dos resultados do processo de pirometalurgia são as emissões gasosas de compostos como hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (PAHs), dióxido de carbono, brometo de hidrogênio (HBr) e entre outros compostos, que podem impactar ecossistemas, vegetação, saúde de animais e a saúde humana. Já o processo de hidrometalurgia tem como impactante a produção de efluentes, devido à utilização de soluções lixiviantes para a recuperação de metais. A literatura apresenta diferentes técnicas de contornar esta limitação em relação à água residuária, como o uso de plasma térmico combinado com lixiviação ácida, tratamento térmico e ácido combinados, recuperação de cobre à temperatura ambiente e recuperação seletiva de estanho.

Os processos de recuperação de metais e reciclagem dos resíduos eletrônicos são capazes de recuperar os mais diversos metais de alto valor agregado como ouro, prata,

cobre, alumínio, ferro, zinco, chumbo e níquel. Mas a literatura apresentou a recuperação de outros elementos como molibdênio, urânio, vanádio, escândio, európio, platina, paládio, ródio e rutênio.

O processo de biolixiviação é apresentado como um processo alternativo aos mais convencionais e difundidos, a pirometalurgia e a hidrometalurgia. Os principais aspectos relacionados ao processo de biolixiviação são físico-químicos, microbiológicos e minerais. Em relação aos aspectos microbiológicos, é importante considerar a diversidade microbiana, densidade populacional, atividades microbianas e a adaptação microbiana. Estes fatores estão relacionados diretamente aos microrganismos que podem ser utilizados para a lixiviação. Os principais microrganismos utilizados para o processo de biolixiviação são bactérias quimiolitotóxicas, fungos, microrganismos secretores de ácido e microbactérias heterótrofas e cada microrganismo, conforme aspectos microbiológicos, possui melhor eficiência para diferentes metais de recuperação. Os microrganismos *Chromobacterium violaceum* e *Pseudomonas aeruginosa* apresentaram eficiência de 73% na recuperação de ouro, sendo os mais eficientes na recuperação de metal de alto valor agregado apresentado na literatura.

Além da biolixiviação e os mais diversos microrganismos capazes de recuperar metais de alto valor agregado, a literatura apresenta processos biológicos como biossorção, fitorremediação e sistema bioeletroquímico. Para a biossorção, que consiste na adsorção de metais pesados que ocorre devido à sua afinidade com materiais de origem biológica, foi apresentada uma combinação híbrida de biossorção e lixiviação química entre o microrganismo *Lactobacillus acidophilus* e o composto tiosulfato de amônio para extrair ouro de placas de circuito impresso descartadas, no qual apresentou uma eficiência de recuperação de 85%. Para o processo de fitorremediação é apresentado o uso dos microrganismos *Achillea millefolium*, *Phleum pratense* e *Thymus kotschyanus*, e utilizando o mecanismo de fitoestabilização, que demonstraram maior eficiência na remediação de cobre de locais contaminados e um sistema de fitorremediação utilizando *Eucalyptus globulus* para remediar vários metais em locais contaminados por resíduo eletrônico. O sistema bioeletroquímico oferece a possibilidade de lixiviação redutiva, ou seja, componentes eletrônicos ricos em metais críticos, como o cobalto, podem ser adsorvidos ao cátodo de uma célula a combustível microbiana

Os metais extraídos de resíduo eletrônico podem ser utilizados como catalisadores para a geração de hidrogênio por meio de eletrólise da água, no qual requer uma fonte de energia externa para dividir a molécula de água. A produção de hidrogênio via eletrólise da água pode ser conduzida por vários dispositivos, como células solares, fotoeletrodos, dispositivos termoelétricos e piroelétricos, nos quais os metais recuperados podem ser utilizados.

9 CONCLUSÕES

A pirometalurgia, a hidrometalurgia e a biolixiviação são três processos metalúrgicos que podem ser utilizados para a reciclagem de resíduos eletrônicos. A pirometalurgia é o processo mais comumente utilizado e mais difundido para a reciclagem de resíduos eletrônicos, com alta eficiência na recuperação de metais. No entanto, a pirometalurgia também é um processo intensivo em energia e pode gerar emissões de poluentes. Já a hidrometalurgia é um processo mais eficiente em termos de energia e menos poluente do que a pirometalurgia. No entanto, a hidrometalurgia pode ser menos eficiente na recuperação de metais de baixa concentração. Enquanto a biolixiviação é um processo que utiliza microrganismos para dissolver os metais de resíduos eletrônicos e o potencial de ser mais eficiente em termos de energia e menos poluente do que os processos pirometalúrgicos e hidrometalúrgicos

A literatura apresenta o tema de processos de recuperação de metais a partir de resíduos eletrônicos, abordando tópicos com foco na composição dos resíduos eletrônicos, ou seja, quais constituintes e elementos são possíveis de recuperar, quais tecnologias podem ser utilizadas para a recuperação dos metais, a eficiência que os processos de recuperação de metais podem apresentar e o impacto ambiental que estes processos podem gerar.

Os processos metalúrgicos de recuperação de metais em resíduos eletrônicos podem gerar uma série de impactos ambientais como a formação de resíduos sólidos, como cinzas, escórias e lamas, de resíduos líquidos, como efluentes industriais, águas de lavagem e drenagem, e emissões gasosas, como gases de combustão e gases oriundos do processo. Além de possíveis emissões de poluentes, por exemplo, partículas finas, metais pesados, compostos voláteis que podem impactar a atmosfera, a água, o solo e gerar riscos à saúde das pessoas.

A biolixiviação, apesar de apresentar técnicas com menor eficiência de recuperação dos metais, é o processo que apresenta menor custo de operação, menor consumo de energia, demonstrando compatibilidade ambiental e utilizando tecnologia simples para realizar a extração de metais.

O campo da Biometalurgia se demonstra muito promissor para o setor de pesquisa e desenvolvimento, no qual a literatura demonstra uma ampla diversidade de estudos, como a utilização de diferentes técnicas com diversos tipos de microrganismos a serem utilizados no processo de biolixiviação e com potencial de maior eficiência para recuperação dos metais em resíduos eletrônicos. Além de apresentar estudos para o uso de metais extraídos dos resíduos eletrônicos como catalisadores para redução de CO₂, para a produção de hidrogênio verde, em tecnologias de energia renovável e em tratamento da água, demonstrando que o processo de recuperação de metais em resíduos eletrônicos pode ter diversas aplicações e destinações adequadas, e contribuindo de forma eficiente em relação ao meio-ambiente.

10 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões, pode-se propor a realização de novas revisões sistemáticas da literatura, aplicando modificações nos filtros:

- Inclusão dos anos entre 2010 e 2016.
- Geração de nova *string* de busca;
- Formulação de novos questionamentos de pesquisa;
- Redefinir critérios de seleção e exclusão.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro/RJ, 2004.

ABDI Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos Análise de Viabilidade Técnica e Econômica, 2013. Pg. 17.

BARROS, D. C.; CARVALHO, G.; RIBEIRO, M. A. **Processo de biossorção para remoção de metais pesados por meio de resíduos agroindustriais: uma revisão**. Revista Biotecnologia & Ciência vol. 06, n.1, pag. 01-15, 2017.

BRASIL. **Política nacional de resíduos sólidos**. Lei 12.305, de 02 de Agosto de 2010. Brasília [Online] 2010. Disponível em:<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 07 de janeiro de 2024.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 10.936**, de 12 de janeiro de 2022. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 jan. 2022. Seção 1, p. 2.

BRIERLEY, J.A.; BRIERLEY, C. L. **Present and future commercial applications of biohydrometallurgy**. Hydrometallurgy 59:233–239, 2001.

CAVALCANTE, H. R. **GESTÃO DE RESÍDUOS ELETRÔNICOS: UM ESTUDO DE REAPROVEITAMENTO DE PRODUTOS DESCARTADOS PELAS EMPRESAS E SOCIEDADE**. Simpósio de Engenharia de Sergipe, São Cristóvão – SE, 2015.

CHEN, Y. *et al.* **β -cyclodextrin enhanced phytoremediation of aged PCBs-contaminated soil from e-waste recycling area**. Environ. Monit. Assess., 12 (7), pp. 1482-1489, 2010.

CHMIELEWSKI, A.G.; URBANSKI, T.S.; MIGDAL, W. **Separation technologies for metals recovery from industrial wastes**. Hydrometallurgy 45(3):333–344, 1997.

CHOI, S.B.; YUN, Y.S. **Biosorption of cadmium by various types of dried sludge: an equilibrium study and investigation of mechanisms**. J. Hazard. Mater., 138 (2006), pp. 378-383, 2006.

CUI, J.; ZHANG, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review.** J Hazard Mater 158:228–256, 2008.

CUI, J; FORSSBERG, E. **Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review.** J Hazard Mater 99(3):243–263, 2003.

DAS, D.; BEHERA, S. K.; MEIKAP, B.C. **Removal of CO₂ in a multistage fluidized bed reactor by amine impregnated activated carbon: optimization using response surface methodology.** International Journal of Coal Science & Technology, 2019.

DO, M. H. et al. **Advances in hydrometallurgical approaches for gold recovery from E-waste: A comprehensive review and perspectives.** Minerals Engineering, vol. 191, 2023.

DUTTA, D. *et al.* **A review on recovery processes of metals from E-waste: A green perspective.** Science of The Total Environment, vol. 859, Part 2, 2023.

GEISE, E, C. **BIOLIXIVIAÇÃO: UMA AVALIAÇÃO DAS INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS NA BIOMINERAÇÃO DE MINERAIS SULFETADOS NO PERÍODO DE 1991 A 2015.** Technol. Metal. Mater. Min., vol. 14, n3, p.192-203, 2017.

GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. **Reciclagem do Lixo de Informática: uma Oportunidade para a Química.** Quim. Nova, Publicação Online, v. 35, n. 7, p. 1486-1492, 2012. Disponível em <<https://www.scielo.br/j/qn/a/KSRbFmmLnnrkxcrKY37QS9m/#>> Acesso em: 02 de janeiro de 2024.

GHAZARYAN, K.; MOVSESYAN, H; GHAZARYAN, N; WATTS, B. A. **Copper phytoremediation potential of wild plant species growing in the mine polluted areas of Armenia.** Environ. Pollut., 249, pp. 491-501, 2019.

ILANKOON, I. M. S. K. et al. **E-waste in the international context – A review of trade flows, regulations, hazards, waste management strategies and technologies for value recovery.** Waste Management, vol. 82, pages 258-275, 2018.

JHA, M.K. *et al.* **Leaching studies for tin recovery from waste e-scrap.** Waste Manag 32:1919–1925, 2012.

- KANG, H. Y.; SCHOENUNG, J. M. **Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options**. Resources, Conservation and Recycling 45, 368–400, 2005.
- KAZA, S. *et al.* **WHAT A WASTE 2.0 – A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Urban Development. Washington, DC: World Bank. <http://hdl.handle.net/10986/30317>, 2018.
- KREBS, W. *et al.* **Microbial recovery of metals from solids**. FEMS Microbiol Rev 20:605–617, 1997.
- LACERDA, L. **Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais**. Revista Tecnológica, São Paulo, n. 74, p.46-50, 2002.
- LEITE, P. R. **Logística Reversa e a competitividade empresarial**. São Paulo, Revista Tecnológica, edit. Publicare, ano XI, nº 117, 2005.
- LEITE, P. R. **Logística Reversa: Meio Ambiente e Competitividade**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.
- LI, X. *et al.* **Water Splitting: From Electrode to Green Energy System**. Nano-Micro Letters, vol 12:131, 2020.
- LUO, J. *et al.* **A real scale phytoremediation of multi-metal contaminated e-waste recycling site with Eucalyptus globulus assisted by electrical fields**. Chemosphere, 201, pp. 262-268, 2018.
- NAVAZO, J. M. V.; MENDEZ, G.V.; PEIRO, L.T. **Material flow analysis and energy requirements of mobile phone material recovery processes**. Int. J. Life Cycle Ass, vol 19, pg 567, 2014.
- NITHYA, R.; SIVASANKARI, C.; THIRUNAVUKKARASU, A. **Electronic waste generation, regulation and metal recovery: a review**. Environ Chem Lett 19, 1347–1368, 2021.
- NORGATE, T.E., JAHANSHAH, S., RANKIN, W.J. **Assessing the environmental impact of metal production processes**. J. Clean. Prod. 15, 838-848, 2007.

PIETROBELLI, J. M. T. A.; MÓDENES, A. N., FAGUNDES-KLEN, M. R.; ESPINOZAQUIÑONES, F. R. **Cadmium, Copper and Zinc Biosorption Study by Non-Living Egeria densa Biomass**, *Water Air Soil Pollut*, vol. 202, p. 385–392, 2009.

PRIYA, A.; HAIT, S. **Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching**. *Environ Sci Pollut Res* 24:6989–7008, 2017.

RATH, S.S. *et al.* **Treatment of electronic waste to recover metal values using thermal plasma coupled with acid leaching- a response surface modelling approach**. *Waste Manag* 32:575–583, 2012.

ROY, J. J. *et al.* **Green Recycling Methods to Treat Lithium-Ion Batteries E-Waste: A Circular Approach to Sustainability**. *Advanced Materials*. vol 34, 2103346, 2022.

SEIF, R.; SALEM, F. Z.; ALLAM, N. K. **E-waste recycled materials as efficient catalysts for renewable energy technologies and better environmental sustainability**. *Environment, Development and Sustainability*, 2023.

SHEEL, A.; PANT, D. **Recovery of gold from electronic waste using chemical assisted microbial biosorption (hybrid) technique**. *Bioresour. Technol.*, 247, pp. 1189-1192, 2018.

TSURUTA, T. **Biosorption and Recycling of Gold Using Various Microorganisms**. *The Journal of General and Applied Microbiology*, 50, 221-228, 2004.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso**. Tese de Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. UFRGS. Porto Alegre, 2005.

WANG, Ni *et al.* **Electrocatalytic hydrogen evolution with gallium hydride and ligand-centered reduction**. *Chemical Science*, 10, 2308–2314, 2019.

WANG, Z.; Li, C.; Domen, K. **Recent developments in heterogeneous photocatalysts for solardriven overall water splitting**. *Chemical Society Reviews*, 48, 2109–2125, 2019.

YAN, A. *et al.* **Phytoremediation: a promising approach for revegetation of heavy metal-polluted land**. *Front. Plant Sci.*, 11, p. 359, 2020.

YANG, H.; LIU, J.; YANG, J. **Leaching copper from shredded particles of waste printed circuit boards.** Journal of Hazard Mater 187:393–400, 2011.

YKEN, J. V. *et al.* **E-Waste Recycling and Resource Recovery: A Review on Technologies, Barriers and Enablers with a Focus on Oceania.** Metals, 11, 1313, 2021.

ZEDALIS, R. J. **International energy law: Rules governing future exploration, exploitation and use of renewable resources.** Disponível em <<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.4324/9781315252056/international-energy-law-rex-zedalis>>, 2017.

ZHANG, S.; FORSSBERG, E. **Mechanical separation oriented characterization of electronic scrap.** Resour Conserv Recy 21(4):247–269, 1997.

ZHENG, K.; BENEDETTI, M. F.; HULLEBUSCH, E. D. van. **Recovery technologies for indium, gallium, and germanium from end-of-life products (electronic waste) – A review.** Journal of Environmental Management, vol. 347, 2023.

ZULKERNAIN, N. H *et al.* **Recovery of precious metals from e-wastes through conventional and phytoremediation treatment methods: a review and prediction.** Journal of Material Cycles and Waste Management, 25:2726–2752, 2023 .