

**INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - CENTRO  
CURSO TÉCNICO EM QUÍMICA**

**ADRIELLY KUESTER DE BONFIM  
DANIELA LAÍS DAUHS  
EMANUELLE DIAS EGER  
ISADORA ELOISA GOLINSKI  
KAIKY GABRIEL DALLMANN MACIEL  
LUCAS CALHARI**

**Desenvolvimento de metodologia para reciclagem de metais de pilhas  
comerciais por rota hidrometalúrgica**

ADRIELLY KUESTER DE BONFIM  
DANIELA LAÍS DAUHS  
EMANUELLE DIAS EGER  
ISADORA ELOISA GOLINSKI  
KAIKY GABRIEL DALLMANN MACIEL  
LUCAS CALHARI

**Desenvolvimento de metodologia para reciclagem de metais de pilhas  
comerciais por rota hidrometalúrgica**

Projeto desenvolvido durante o período do Conectando Saberes de 2024.2, do Curso Técnico em Química do Instituto Federal de Santa Catarina, câmpus Jaraguá do Sul – Centro, como requisito avaliativo de conhecimentos do programa Conectando Saberes.

Orientador: Giovani Pakuszewski  
Coordenador de fase: Ana Paula Aparecida Duarte  
Souza

Jaraguá do Sul  
2024.2

## LISTA DE FIGURA

Figura 1 - Fluxograma para a reciclagem de pilhas e baterias por rota hidrometalúrgica.....	13
---	----

## LISTA DE QUADRO

Quadro 1 - Quadro com solubilidade de possíveis compostos formados com cátions presentes nas pilhas comerciais.....	17
---	----

## SUMÁRIO

<b>1 TEMA.....</b>	<b>5</b>
<b>2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....</b>	<b>5</b>
<b>3 PROBLEMA DE PESQUISA.....</b>	<b>5</b>
<b>4 HIPÓTESES.....</b>	<b>5</b>
<b>5 OBJETIVOS.....</b>	<b>6</b>
5.1 OBJETIVO GERAL.....	6
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	6
<b>6 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>6</b>
<b>7 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA / REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>9</b>
7.1 MODELOS DE PILHAS.....	9
7.2 COMPOSIÇÃO DE PILHAS.....	10
7.2.1 Pilhas secas.....	10
7.2.2 Pilhas alcalinas.....	10
7.2.3 Pilhas chumbo-ácido (Bateria).....	11
7.2.4 Pilhas níquel-cádmio, Níquel-hidreto metálico e íon lítio.....	11
7.3 FORMAS DE PROCESSAMENTO / EXTRAÇÃO DOS METAIS.....	11
7.4 POSSÍVEIS METODOLOGIAS DE TRATAMENTOS HIDROMETALÚRGICOS	13
7.4.1 Processos de digestão dos materiais.....	14
7.4.2 Lixiviação.....	15
7.4.3 Extração por solventes.....	15
7.4.4 Troca iônica.....	15
7.5 PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DOS METAIS MINERALIZADOS.....	16
7.5.1 Eletrometalurgia.....	16
7.5.2 Precipitação e cementação.....	17
7.5.3 Eletrólise.....	18
<b>8 METODOLOGIA.....</b>	<b>19</b>
8.1 DIGESTÃO ÁCIDA.....	19
8.2 PRECIPITAÇÃO.....	20
<b>9 CRONOGRAMA.....</b>	<b>20</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>22</b>

## 1 TEMA

Estudo de processos de reciclagem de metais presentes em pilhas comerciais.

## 2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Investigação dos processos de digestão e hidrometalurgia para reciclagem de metais presentes em pilhas comerciais.

## 3 PROBLEMA DE PESQUISA

O presente trabalho entende que a consequência do descarte incorreto de pilhas provoca lixiviação de íons metálicos (contaminantes emergentes<sup>1</sup>). Os principais problemas causados são a contaminação de lençóis freáticos e rios, poluindo a água para o consumo humano e a vida aquática que ali habita. Portanto, não é apenas um problema de gestão de resíduos, mas uma questão de saúde pública e conservação ambiental. Um recurso alternativo para o recolhimento, reciclagem e destinação de pilhas comerciais e resíduos gerados poderia trazer uma melhora significativa para a sociedade brasileira, já que não há um incentivo a sistemas de coleta e reciclagem mais eficazes. Portanto, se levanta a seguinte questão: “Quais procedimentos e técnicas que podem ser criados (ou melhorados) para que o processo de descarte e reciclagem das pilhas e de seus materiais provenientes, contaminantes emergentes, aconteçam de maneira rápida e eficiente, minimizando os impactos à população e ao meio ambiente?”

## 4 HIPÓTESES

- As pilhas comerciais da atualidade não contém chumbo e mercúrio na composição;
- É possível realizar a digestão dos materiais presentes nas pilhas utilizando soluções de ácidos e/ou bases concentradas;

---

<sup>1</sup> São substâncias que apresentam diferentes níveis de potencial para causar danos ao meio ambiente e à saúde humana (Jesus, 2020).

- Os metais das pilhas comerciais formam compostos de baixa solubilidade e podem ser separados após a digestão por precipitação;
- Os sais ou hidróxidos metálicos precipitados podem ser purificados.

## **5 OBJETIVOS**

### **5.1 OBJETIVO GERAL**

Utilizar processos hidrometalúrgicos para a reciclagem de metais presentes nas pilhas comerciais.

### **5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Planejar e realizar testes de digestão ácida e alcalina para mineralizar os metais das pilhas;
- Investigar a presença de chumbo e mercúrio nas pilhas comerciais;
- Pesquisar e realizar testes qualitativos para identificar metais nas soluções após mineralização dos metais;
- Realizar testes quantitativos para determinar as concentrações aproximadas dos metais nas soluções contendo os íons metálicos digeridos;
- Executar testes de precipitação dos íons metálicos;
- Realizar testes de purificação dos compostos precipitados;
- Determinar o grau de pureza de cada composto obtido.

## **6 JUSTIFICATIVA**

O uso de pilhas é essencial para permitir uma maior mobilidade e independência de dispositivos em relação à rede elétrica, ampliando seu uso no cotidiano da sociedade. Com o avanço tecnológico, o aumento do uso de dispositivos eletrônicos também elevou o consumo de pilhas descartáveis, o que resultou em um crescimento acelerado na produção e, conseqüentemente, no descarte inadequado, muitas vezes devido à falta de informação. Segundo Reidler, Günther (2002) ainda no final dos anos 1970 grande parte das pilhas possuíam mercúrio metálico em sua composição, e foi nesse período que surgiram as

primeiras preocupações sobre os riscos ambientais e sociais relacionados ao descarte de pilhas no lixo comum.

Essas preocupações, apenas no fim da década de 1990, geraram atitudes dos órgãos governamentais, que deram início a legislações como uma tentativa de reduzir esses impactos. A partir de 30 de junho de 1999, entrou em vigor a Resolução CONAMA nº 257/1999, trazendo apenas leis para pilhas que contêm em sua composição Chumbo, Cádmiio e Mercúrio. Nove anos depois a RESOLUÇÃO CONAMA nº 401 de 4 de novembro de 2008 revogou a legislação anterior, estabelecendo “[...] os limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e os critérios e padrões para o seu gerenciamento ambientalmente adequado, e dá outras providências [...]”. Ela é a maior responsável pelo modo de tratamento desses resíduos no território brasileiro. Desde então, não houve alterações para leis mais restritas sobre o descarte e impactos na população e ambiente.

A Resolução CONAMA nº 401 também estabelece responsabilidade ao ciclo de consumo e pós-consumo aos fabricantes e importadores deste produto, como é visto na Instrução Normativa de 2012, Art. 1º “Instituir, para fabricantes nacionais e importadores, os procedimentos relativos ao controle do recebimento e da destinação final de pilhas e baterias ou produtos que as incorporem”.

Pela falta de divulgação e conhecimento das Resoluções da CONAMA e das responsabilidades atribuídas aos fabricantes sobre o descarte de pilhas, muitas vezes esses resíduos tóxicos acabam sendo descartados em lixo orgânico e/ou reciclado gerando um número agravante de toxicidade ao meio ambiente. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) cerca de 1% do lixo urbano é constituído por resíduos sólidos urbanos contendo elementos tóxicos (Brum *et al.*, 2010). Vale salientar que 1% do resíduo urbano no Brasil, anualmente, são em média 818 mil toneladas.

Esse descarte indevido acarreta na poluição do solo e dos lençóis freáticos, visto que as pilhas ao irem para locais inadequados passam pelo “[...] ato de extrair de substâncias, cinzas ou resíduos, algum sal ou princípios solúveis através da passagem de uma solução por uma substância porosa [...]” (Lixiviação, 2024), que é o processo de lixiviação.

O processo de lixiviação de pilhas e baterias têm um peso muito grande quando falamos dos responsáveis pela poluição de lençóis freáticos e rios. O que

acontece é que as estações de tratamento de água tem dificuldades de retirar totalmente os resíduos de metais pesados, que acabam indo para o consumo humano, o que acarreta na ingestão desses elementos, trazendo diversos malefícios para a população.

“Destacamos como prejudiciais ao homem os seguintes: mercúrio (Hg), cujos principais prejuízos estão relacionados ao sistema nervoso; cádmio (Cd), que favorece a geração de radicais livres e a formação de cálculos renais, aumentando a pressão arterial, deprimindo o sistema imunológico, estando, também, associado a problemas ósseos” (Gomes; Melo, 2006 p. 12, *apud* Campos, 2003).

Outros autores também argumentam sobre males de íons metálicos contidos na composição das pilhas:

“Chumbo (Pb) é um agente teratogênico, que provoca dor de cabeça e muscular, fadiga, emagrecimento, obstipação, vômitos, anemia, dificuldade de concentração, lentidão de raciocínio, irritabilidade, perda de memória e de coordenação, vertigens e depressão, hiperatividade,, debilidade muscular e encefalopatia; lítio (Li) afeta o sistema nervoso central, gerando visão turva, ruídos nos ouvidos, vertigens, debilidade e tremores; níquel (Ni) provoca dermatites, distúrbios respiratórios, gengivites, sabor metálicos, “sarna de níquel”, efeitos carcinogênicos, cirrose e insuficiência renal; zinco (Zn) provoca irritação gastrointestinal e vômitos; cobalto (Co) causa a “sarna do cobalto”, conjuntivite, bronquite e asma; dióxido de manganês (MnO<sub>2</sub>) provoca anemia, dores abdominais, vômitos, crises nervosas, dores de cabeça, seborreia, impotência, tremores nas mãos, perturbação emocional” (Gomes; Melo, 2006 p. 12, *apud* Bardini, 2004).

Outra forma de ingestão que também deve ser comentada é quando esses elementos infectam a vida aquática que ali vive. Como explica Basta (2023) “Os peixes, em particular, acumulam o metal em seus tecidos ao longo do tempo e quando consumidos podem representar um risco significativo para a saúde, causando danos neurológicos e afetando o desenvolvimento fetal, por exemplo.” Assim, podemos entender que o descarte incorreto de pilhas e baterias é muito prejudicial não só para a saúde humana como também é prejudicial para a natureza de modo geral.

Abordaremos principalmente as pilhas comerciais para uso doméstico, ou seja, aquelas encontradas em supermercados, tendo em vista que são as de mais fácil acesso.

## **7 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA / REVISÃO DE LITERATURA**

Na fundamentação teórica discorreremos sobre os modelos de pilhas mais utilizadas e suas composições, juntamente com as formas de processamento / extração dos metais. Além disso, investigamos possíveis metodologias que podem ser utilizadas e, por fim, os processos de recuperação dos metais mineralizados.

### **7.1 MODELOS DE PILHAS**

Existem diversos modelos de pilhas com características distintas de tamanho, e peso, tais características influenciam diretamente na potência e na durabilidade. A capacidade de uma pilha é medida em mAh (“miliampères-hora”) a tensão da corrente é medida em V (Volts). Podendo se distinguir nos seguintes modelos:

Pilha modelo AA também é nomeada de R6 pela IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) e LR6 na versão alcalina. Essas pilhas têm 14 mm de diâmetro e 50 mm de altura. Sua tensão nominal é de 1,5 V. E as atuais têm uma capacidade de 1600 a cerca de 2500 mAh. A pilha AAA também nomeada de R03 pela IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) e LR03 na versão alcalina, possui 44,5 mm de comprimento e 10,5 mm de diâmetro. Seu peso varia de 7g a 15g em relação a composição da mesma. Tensão nominal de 1,5 V e capacidade de 800 mAh a cerca de 1200 mAh. Existe também a pilha C ou R14, têm 23 mm de diâmetro e 50 mm de altura, com tensão nominal de 1,5 V. A sua capacidade pode chegar até 8000 mAh. E por fim ainda há a pilha D conhecida como “pilhas bujão” ou até mesmo R20, são pilhas secas, de formato cilíndrico com 33 mm de diâmetro e 58 mm de altura. A sua capacidade é de até 21000 mAh, ou seja, apresentam alta capacidade, por isso são utilizadas em aparelhos que ficam muito tempo ligados (TME Electronic Component, 2020).

Além disso as pilhas são também divididas em primárias e secundárias. "As pilhas e baterias primárias são aquelas que não podem ser recarregadas. Uma vez que a reação de transferência de elétrons cessa, a pilha para de funcionar" (Fogaça,

s.d). Já as secundárias são recarregáveis "Essas reações são reversíveis, assim, essas baterias podem ser recarregadas se colocadas em um aparelho que conduz corrente elétrica e provoca a reação inversa" (Fogaça, s.d).

## 7.2 COMPOSIÇÃO DE PILHAS

De acordo com Perillo (2020) Para o funcionamento da pilha deve haver componentes normalmente metálicos que reajam, gerando os processos de oxidação e redução, são eles:

O agente oxidante, responsável por perder elétrons e o agente redutor responsável por ganhar elétrons, essa transferência irá gerar uma diferença de potencial e conseqüentemente uma corrente elétrica.

Para conduzir os elétrons da oxiredução as pilhas possuem ao menos dois eletrodos e um eletrólito. O ânodo que flui para perda de elétrons e o cátodo que flui para o ganho de elétrons que ocorre por meio do eletrólito, onde nas pilhas de Daniels uma solução aquosa ou nas secas onde possui consistência de pasta. nesta ponte salina existem íons, que o capacitam a transmitir os elétrons do ânodo para o cátodo.

### 7.2.1 Pilhas secas

A pilha seca ou comum é composta por zinco metálico em forma de cilindro que desempenha o papel de ânodo. O cátodo é o carbono grafite que é envolto por uma mistura de dióxido de manganês, carvão em pó e uma pasta úmida constituída de cloreto de amônio e cloreto de zinco (INMETRO, 2024).

### 7.2.2 Pilhas alcalinas

As pilhas alcalinas, são os tipos de pilhas primárias mais comuns, constituída por solução básica de hidróxido de potássio, onde entra em contato com o zinco metálico, ânodo das pilhas, quando é incorporado em um gel. A mistura de grafite e dióxido de manganês, atua como cátodo, este é separado do ânodo por um tecido poroso e possui uma estrutura de aço o envolvendo para prevenir vazamentos (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p.750).

### 7.2.3 Pilhas chumbo-ácido (Bateria)

As pilhas de chumbo-ácido possuem o cátodo sendo constituído por dióxido de enxofre e o ânodo de chumbo, ambos sendo imersos em ácido sulfúrico. Não é necessário que haja uma divisão para separar o ânodo do cátodo, já que ambos são sólidos e entram em contato apenas quando as placas dos eletrodos se tocam, sendo utilizado espaçadores de madeira ou fibra de vidro para evitar o contato direto (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 749).

### 7.2.4 Pilhas níquel-cádmio, Níquel-hidreto metálico e íon lítio

Um pacote de bateria de níquel-cádmio possui geralmente três ou mais células em série para produzir, essa é constituída por oxi-hidróxido níquel que é reduzido no cátodo e o cádmio metálico, oxidado no ânodo (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 750).

Nas baterias de níquel-hidreto metálico uma liga metálica que possui a capacidade de absorver átomos de hidrogênio, é utilizada como ânodo e o cátodo é igual das baterias de níquel-cádmio (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 750-751).

As baterias de íon-lítio funcionam com base na inserção e remoção reversível de íons de lítio em sólidos em camadas. O grafite é geralmente utilizado como um eletrodo e o outro utilizado é de cobalto e lítio. Ao serem carregados os íons cobalto são oxidados e ocorre o deslocamento de íons de lítio para o grafite, que durante a descarga retornam ao cátodo, assim gerando corrente elétrica (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 750-751).

## 7.3 FORMAS DE PROCESSAMENTO / EXTRAÇÃO DOS METAIS

Segundo Mantuano, Espinosa, Wolff, Mansur e Schwabe (2011) o processo de reciclagem<sup>2</sup> de pilhas e baterias têm duas principais etapas: preparação da sucata e processamento metalúrgico.

---

<sup>2</sup> A reciclagem, em sistemas de gestão de resíduos, envolve coleta seletiva, triagem e preparo de materiais para uso como matéria-prima secundária, como transformar plástico PET em fibras. Isso economiza recursos, reduz a poluição e prolonga a vida útil de aterros. Já reutilizar significa dar nova função ou reaproveitar materiais para seu uso original (Ribeiro *et al.*, 2014).

Na preparação da sucata, o material passa por uma triagem, onde é separado por tipo de pilha. Esta etapa pode incluir técnicas como separação mecânica por tamanho, uso de campo magnético, imagens de raios-X ou sensores óticos para leitura eletrônica de códigos localizados no corpo do material coletado. Depois da triagem, ocorre o condicionamento físico, com operações de britagem, cominuição, separação magnética ou eletrostática ou em meio denso, pretendendo separar e concentrar os metais de interesse (Mantuano *et al.*, 2011, p. 3-6).

O processamento metalúrgico segundo Mantuano, Espinosa, Wolff, Mansur e Schwabe (2011) pode seguir rotas pirometalúrgicas ou hidrometalúrgicas, ou ainda combinar ambas. A pirometalurgia utiliza fornos e altas temperaturas para fundir metais, enquanto a hidrometalurgia emprega soluções químicas para dissolver e separar os metais, com escolha do método dependendo das características dos metais a serem recuperados (Mantuano *et al.*, 2011, p. 3-6).

A rota pirometalúrgica para reciclagem de baterias envolve o uso de altas temperaturas para recuperar metais. No caso de baterias Ni-Cd, o processo é baseado na destilação do cádmio, onde o aquecimento resulta na decomposição de hidróxidos e na recuperação dos metais em vapor, que para Mantuano, Espinosa, Wolff, Mansur e Schwabe (2011) “ocorre em temperaturas da ordem de 900 °C, a vácuo, com atmosfera inerte ou ainda com atmosfera redutora”, e no caso de pilhas zinco-carbono, a separação dos componentes ocorre conforme os diferentes pontos de ebulição de cada metal (como mercúrio e zinco), possibilitando a recuperação do zinco por destilação a temperaturas superiores a 920 °C. Em fornos de até 1350 °C, também é possível tratar resíduos como poeiras de aciaria elétrica. Baterias recarregáveis Ni-MH, quando misturadas, permitem a recuperação do níquel, mas não de elementos terras-raras (Mantuano *et al.*, 2011, p. 3-6).

A reciclagem de pilhas e baterias por hidrometalurgia envolve principalmente a lixiviação ácida ou básica da sucata, que transfere os metais desta para uma solução aquosa. Após a lixiviação, a solução passa por etapas de purificação para remover impurezas que possam afetar a recuperação dos metais, ao fim dessas etapas pode-se recuperar o soluto tanto na forma metálica pura como também na de hidróxidos ou sais (Mantuano *et al.*, 2011, p. 3-6).

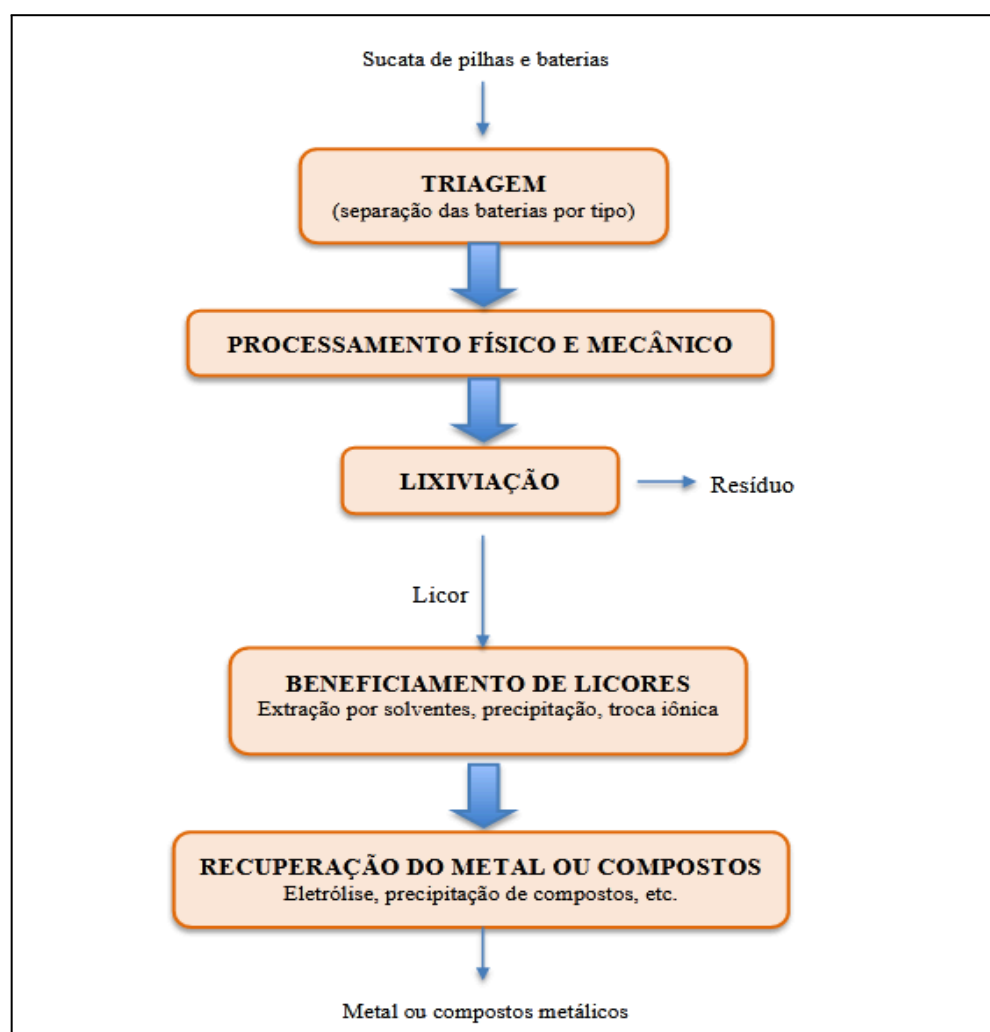
As técnicas de purificação incluem extração por solventes, troca iônica, precipitação e cementação, permitindo a separação seletiva dos metais de interesse. No caso do zinco, impurezas como cádmio diminuem sua pureza final. Após a

purificação, o zinco é recuperado por eletrólise com alta pureza, sendo uma vantagem dos processos hidrometalúrgicos, que recuperam o zinco na forma metálica, ao contrário dos processos pirometalúrgicos, que resultam em óxidos. No caso de baterias Ni-Cd, o processo é similar, separando níquel e cádmio por extração e recuperando-os também via eletrólise (Mantuano *et al.*, 2011, p. 3-6).

#### 7.4 POSSÍVEIS METODOLOGIAS DE TRATAMENTOS HIDROMETALÚRGICOS

A hidrometalurgia trata do processo de separação de metais através da dissolução destes em meio ácido (Ciminelli, 2006, p. 157-159). O processo como um todo pode ser dividido em 5 etapas, sendo elas: preparação, lixiviação, separação sólido/líquido, tratamento da solução e recuperação do metal, conforme a figura 1.

Figura 1 - Fluxograma para a reciclagem de pilhas e baterias por rota hidrometalúrgica



Fonte: (Mantuano *et al.*, 2011)

A etapa de preparação do metal é onde se percebem suas características físico-químicas e as modificam, quando necessário, para o processo de lixiviação. O processo de lixiviação se refere à dissolução de metais em meio ácido (como o ácido sulfúrico), básico ou contendo agentes complexantes. Após isso, é feita a separação de sólidos e líquidos, onde é guardado o que interessa à pesquisa e trata-se a solução restante que posteriormente será descartada. O último processo é a recuperação dos metais, que podem ser obtidos como sais ou hidróxidos metálicos. Para isso são utilizados processos na forma metálica, esses utilizam de reações de redução. Podem ser recuperados também através de processos de precipitação e/ou cristalização dos metais.

#### **7.4.1 Processos de digestão dos materiais**

A digestão ácida é uma técnica amplamente utilizada para a decomposição de materiais inorgânicos, particularmente eficaz para amostras que podem ser solubilizadas por ácidos. Essa abordagem é baseada no uso de ácidos fortes como ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), ácido clorídrico ( $\text{HCl}$ ), ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) e ácido fluorídrico ( $\text{HF}$ ) para quebrar as ligações químicas dos componentes da amostra, transformando-os em soluções solúveis. Essa técnica é comum em análises de metais e outros elementos químicos presentes em minerais, solo, água e outros materiais inorgânicos (Krug; Rocha, 2019, p. 221-236).

Ela é frequentemente realizada em sistemas fechados, como digestores ou autoclaves, para evitar a perda de elementos voláteis e garantir uma decomposição completa. A escolha do ácido e das condições de digestão, como temperatura e tempo, depende do tipo de material a ser analisado. Materiais mais resistentes, como rochas e minérios, podem necessitar de condições de digestão mais rigorosas, com o uso de misturas ácidas ou temperaturas elevadas para garantir a dissolução completa (Krug; Rocha, 2019, p. 221-236).

Durante o processo, é importante monitorar a formação de possíveis resíduos ou precipitados que podem interferir na análise subsequente. Além disso, a escolha do ácido deve ser feita com base nas características do material, já que alguns elementos podem formar complexos com certos ácidos, o que pode dificultar a análise posterior. A solubilização dos materiais e a remoção de impurezas são essenciais para a obtenção de resultados precisos, sendo a filtração ou

centrifugação frequentemente utilizadas para separar qualquer material não dissolvido (Krug; Rocha, 2019, p. 221-236).

A digestão ácida é uma técnica vantajosa por sua simplicidade e custo relativamente baixo, mas exige cuidado para evitar a contaminação da amostra, o que pode ocorrer devido ao uso de materiais inadequados para o recipiente ou pela manipulação incorreta dos ácidos. Para evitar essas contaminações, é comum o uso de frascos de vidro ou plásticos especiais, além de procedimentos rigorosos de limpeza e manuseio (Krug; Rocha, 2019, p. 221-236).

#### **7.4.2 Lixiviação**

A lixiviação é um processo essencial para a extração de metais de sucatas previamente tratadas através de um agente lixiviador, sendo dissoluções aquosas de ácidos, bases ou sais. Assim, transferindo os metais do estado sólido para uma solução aquosa. Nessa etapa, a solução passa por processos de purificação, permitindo a recuperação dos metais, que podem ser obtidos na forma metálica pura ou como compostos, como hidróxidos ou sais (Mantuano *et al.*, 2011, p. 5) (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 862). Normalmente neste processo, há formação de um íon complexo (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 862).

#### **7.4.3 Extração por solventes**

A extração por solventes utiliza uma fase orgânica para isolar o metal de interesse da solução aquosa, assim o solvente orgânico mantém-se carregado pelo metal desejado. Em seguida, ocorre a etapa de reextração, na qual o metal presente na fase orgânica é transferido para outra fase aquosa, livre de outros metais. Após as etapas de extração e reextração, obtêm-se duas fases aquosas: a solução original sem o metal separado e uma segunda solução onde o metal é concentrado e extraído (Mantuano *et al.* 2011, p. 5).

#### **7.4.4 Troca iônica**

Parecida com a extração por solvente, na troca iônica o metal de interesse é inicialmente capturado por uma resina sólida. Em seguida, ocorre a etapa de

eluição, na qual o metal é transferido da resina para uma solução aquosa separada. Esse processo resulta em duas soluções semelhantes às obtidas no item 7.4.2 (Mantuano *et al.*, 2011, p. 5-6).

## 7.5 PROCESSOS DE RECUPERAÇÃO DOS METAIS MINERALIZADOS

Os processos de recuperação de metais se tratam de métodos que visam resgatar os metais mineralizados dissolvidos em solução. Para isso, a seguir, discutiremos os processos de eletrometalurgia, precipitação e cementação e eletrólise.

### 7.5.1 Eletrometalurgia

A eletrometalurgia trata-se de processos, como a eletrólise, para a redução ou refinamento de metais. Esse processo é utilizado para metais mais reativos, como o alumínio, e que não podem ser conseguidos a partir de soluções aquosas, visto que a água é reduzida mais facilmente que os íons metálicos. Para que o processo seja possível, colocamos no meio um sal fundido que seja de interesse do íon metálico e assim, mais facilmente reduzido (Brown; Lemay; Bursten, 2005 p. 862).

Na eletrometalurgia do NaCl, por exemplo, é adicionado CaCl<sub>2</sub> com a intenção de baixar o ponto de fusão da substância. Na<sub>(l)</sub> e Cl<sub>(g)</sub> são produzidos a partir da eletrólise e mantidos de forma a não entrarem em contato e formarem novamente NaCl. Também se é mantido o metal fora de contato do oxigênio, visto que esse o oxida (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 863).

A partir do processo de Hall, a eletrometalurgia do alumínio é feita da seguinte forma: para baixar o ponto de fusão do óxido de alumina foi utilizado criolita (Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>) como fundente. Essa mistura foi colocada numa cuba eletrolítica e, por ela, passa uma corrente elétrica. As paredes da cuba, que são revestidas com carbono, atuam como cátodo, para que fosse possível ocorrer a redução do alumínio. O ânodo são cilindros de carbono grafite que servem para fazer a oxidação do oxigênio. O carbono interage com o oxigênio sobrando assim, o alumínio. A reação global é dada por:  $2\text{Al}_2\text{O}_3_{(l)} + 3\text{C}_{(s)} \rightarrow 4\text{Al}_{(l)} + 3\text{CO}_2_{(g)}$ . O alumínio resultante é

mais denso que a mistura de criolita, por isso se deposita no fundo, onde é recolhido (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 863).

### 7.5.2 Precipitação e cementação

A precipitação é amplamente empregada na reciclagem de pilhas e baterias, sendo realizada por meio da variação de pH com a adição de reagentes como soda (NaOH), cal (CaO), barrilha (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), entre outros. Já a cementação envolve uma reação de deslocamento, na qual um metal menos nobre é adicionado à solução, reduzindo o íon de um metal mais nobre (Mantuano *et al.*, 2011).

De acordo com Andrade (2022, p.2, *apud* Lieser) a precipitação de hidróxidos e sais ocorre pelo processo de agregação das moléculas ou íons pelo processo de nucleação heterogênea ou homogênea. A nucleação heterogênea começa com a introdução de matéria, esse processo não depende da supersaturação do meio. O processo homogêneo, ao contrário do heterogêneo, depende da supersaturação do meio, e acontece devido às partículas maiores formadas pela junção de íons dissolvidos, neste processo não há dependência de outras substâncias.

A tabela de sólidos e suas características de solubilidade, sendo possível de ser consultada no quadro 1, nos mostra diferentes ânions e onde cada um é solúvel e insolúvel.

Quadro 1 - Quadro com solubilidade de possíveis compostos formados com cátions presentes nas pilhas comerciais

Ânion	Zn <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Pb <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup>	Cd <sup>2+</sup>
Acetato (C <sub>2</sub> H <sub>3</sub> O <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Solúvel em água	Solúvel em água	Solúvel em água	Solúvel em água	Solúvel em água
Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente e solúvel em água	Moderadamente solúvel em água
Cloreto (Cl <sup>-</sup> )	Solúvel em água	Solúvel em água	Solúvel em água	Solúvel em água	Solúvel em água
Cromato (CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido
Hidróxido (OH <sup>-</sup> )	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Moderadamente solúvel em água	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Moderadamente solúvel em água

Oxalato ( $C_2O_4^{2-}$ )	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água
Óxido ( $O^{2-}$ )	Insolúvel	Insolúvel	Moderadamente solúvel em ácido	Insolúvel	Insolúvel
Fosfato ( $PO_4^{3-}$ )	Insolúvel	Insolúvel	Insolúvel	Insolúvel	Insolúvel
Silicato ( $SiO_3^{2-}$ )	Moderadamente solúvel em ácido	Moderadamente solúvel em ácido	Insolúvel	Moderadamente solúvel em ácido	Insolúvel
Sulfato ( $SO_4^{2-}$ )	Solúvel em água	Solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Solúvel em água	Solúvel em água
Sulfeto ( $S^{2-}$ )	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido	Insolúvel em água e solúvel em ácido
Tartarato ( $C_4H_4O_6^{2-}$ )	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água	Moderadamente solúvel em água

Adaptado de: (Krug; Rocha, 2019).

### 7.5.3 Eletrólise

O processo que ocorre em células eletrolíticas e oferece uma fonte externa de energia elétrica para reações de redox não espontâneas acontecerem, denomina-se de eletrólise. Ou seja, é o processo que promove a energia elétrica necessária para reações que não ocorrem em células voltaicas (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 755).

A célula eletrolítica compõe-se em dois eletrodos em um sal fundido ou uma solução. Igualmente como as células voltaicas, esses eletrodos são chamados de Cátodo onde ocorre a redução e de Ânodo onde acontece a oxidação. Assim, uma bateria ou qualquer outra fonte de corrente elétrica direta atua como bomba de elétrons dentro de um eletrodo os puxando de outro eletrodo (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 755).

Na eletrólise de NaCl fundido, por exemplo, os íons  $Na^{1+}$  recebem elétrons e são reduzidos a Na no cátodo. À medida que os íons  $Na^{1+}$  próximos do cátodo são esgotados, íons  $Na^{1+}$  adicionais migram para ele. Analogamente, existe um

movimento líquido de íons  $\text{Cl}^-$  para o anodo, onde eles são oxidados (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 755). A obtenção de metais ativos através da eletrólise só é possível em meio a sal fundido, pois o íon metálico é a espécie que se reduz facilmente (Brown; Lemay; Bursten, 2005, p. 863).

## 8 METODOLOGIA

Os métodos que serão utilizados para executar a pesquisa serão divididos em cinco etapas, sendo elas a coleta de amostras, separação física, digestão ácida, precipitação e purificação dos compostos obtidos.

A primeira etapa a ser realizada será a coleta de amostra, onde serão coletadas pilhas comerciais descartadas e com sua vida útil consumida. Essas coletas poderão ser feitas no campus Jaraguá do Sul - Centro com a ajuda de outros estudantes, servidores e funcionários. Também será realizado um treinamento teórico e prático sobre as técnicas analíticas (qualitativas e quantitativas) que serão utilizadas na etapa posterior à digestão dos metais.

Em seguida, será executado o processo de separação, sendo ela mecânica. A classificação será por tipos e composição, prevista no item 7.2. Após esta etapa, serão realizadas análises qualitativas por espectrofotometria (análises metalocrômicas) e quantitativas (espectrometria por absorção atômica em chama - FAAS) dos metais presentes na solução digestiva. Posteriormente serão efetuadas as precipitações dos íons metálicos na forma de compostos (sais ou hidróxidos). Por fim, os compostos metálicos serão purificados.

### 8.1 DIGESTÃO ÁCIDA

A terceira etapa consiste na digestão ácida (que foi apresentada como lixiviação na Figura 1), em que com o uso de ácidos como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e  $\text{HCl}$ , amostras de materiais inorgânicos são decompostos por terem suas ligações químicas quebradas, o que os transforma em soluções solúveis (Krug; Rocha, 2019, p. 221-236).

Durante o processo, será monitorado a formação de resíduos ou precipitados, já que podem interferir na análise subsequente, com a remoção de impurezas sendo essencial para a obtenção de resultados precisos, usando métodos como a filtração

ou a centrifugação para a remoção dos materiais não dissolvidos (Krug; Rocha, 2019, p. 221-236).

Essa técnica foi selecionada devido a sua ampla utilização em análises de elementares de metais, por ser eficiente na mineralização de muitos compostos; sejam eles de natureza orgânica ou inorgânica e também devido à simplicidade e custo relativamente baixo dos reagentes envolvidos (Krug; Rocha, 2019, p. 221-236).

## 8.2 PRECIPITAÇÃO

A penúltima etapa será então, a precipitação, que consiste na utilização dos coeficientes de solubilidade dos possíveis compostos formados pelos cátions metálicos a partir de reações com ânions específicos. O objetivo é precipitar os íons metálicos de forma seletiva. Neste processo, o precipitado não depende da supersaturação da solução para que ocorra (Andrade, 2022, p.2, *apud* Lieser); dependendo exclusivamente das condições de temperatura, pressão e da solubilidade em água, do sal ou hidróxido formado, condições que deverão ser estudadas pelo grupo.

Por fim, após a formação do precipitado, o grupo fará um processo de separação e purificação dos compostos formados na precipitação. Os resíduos sólidos serão encaminhados para aterro industrial e as soluções ácidas ou alcalinas serão tratadas, para posterior decantação, filtração e descarte.

## 9 CRONOGRAMA

2025.1	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Julho
Revisão do projeto a partir das considerações da banca	X					
Revisão bibliográfica	X	X				
Coleta de pilhas	X	X				

Treinamento das técnicas analíticas		X	X			
Separação mecânica e classificação das pilhas		X				
Digestão ácida			X	X		
Precipitação dos metais					X	
Elaboração e apresentação do relatório parcial					X	X

2025.2	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro	Dezembro
Revisão do projeto a partir das considerações da banca	X				
Revisão bibliográfica	X	X			
Elaboração de procedimento operacional padrão para o processo		X			
Ampliação de escala para os processos			X		
Purificação dos compostos obtidos			X	X	
Confecção e apresentação do artigo				X	X

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, João Carlos de. **Química Analítica Básica: As Reações de Precipitação**. Disponível em: <https://econtents.bc.unicamp.br/inpec/index.php/chemkeys/article/download/16099/10896/41064>. Acesso em: 24 nov. 2024.
- BASTA, Dr. Paulo Cesar. **Contaminação por mercúrio no Brasil: um desafio crescente, um desafio crescente**. 2023. Disponível em: <https://sbmt.org.br/contaminacao-por-mercurio-no-brasil-um-desafio-crescente/>. Acesso em: 14 out. 2024.
- BRASIL, CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 401, de 4 de novembro de 2008. “Dispõe sobre o limite de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional e dá outras providências”. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/residuos/pilhas-e-baterias#pilhas-e-baterias>. Acesso em: 9 out. 2024.
- BROWN, Theodore L.; LEMAY, H. Eugene Jr.; BURSTEN, Bruce E. **Química: A ciência central**. 9ª edição. Pearson Universidades, jan. 2005. Disponível em: <https://archive.org/details/9788587918420/page/n5/mode/2up>. Acesso em: 10 out. 2024.
- BRUM, Zélio Rumpel et al. **Educação ambiental no uso e descarte de pilhas e baterias**. 2010. 41 f. Monografia (Especialização) - Curso de Educação Ambiental, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), São Vicente do Sul, 2010. Disponível em: [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/1220/Brum\\_Zelio\\_Rumpel.pdf?sequencia=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/1220/Brum_Zelio_Rumpel.pdf?sequencia=1&isAllowed=y). Acesso em: 22 out. 2024.
- CIMINELLI, Virginia S. T. **Hidrometalurgia**. p. 158-174, 2006. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1288/1/Tend%C3%AAnciasParte2.4.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- FOGAÇA, Jennifer Rocha Vargas. **Pilhas e baterias secundárias**. Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/pilhas-baterias-secundarias.htm>. Acesso em 12 de nov. de 2024.
- GOMES, Ana Carla Lavagnolli et al. **Pilhas e efeitos nocivos**. Arquivos do Mudi, Maringá, v. 10, n. 3, p. 10-15, 18 dez. 2006. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Silvana-De-Melo/publication/237804740\\_PILHAS\\_E\\_EFEITOS\\_NOCIVOS/links/541cb03b0cf2218008cdb6e5/PILHAS-E-EFEITOS-NOCIVOS.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Silvana-De-Melo/publication/237804740_PILHAS_E_EFEITOS_NOCIVOS/links/541cb03b0cf2218008cdb6e5/PILHAS-E-EFEITOS-NOCIVOS.pdf). Acesso em: 22 out. 2024.
- INMETRO. **Pilhas Alcalinas e Zinco - Manganês**. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/Consumidor/produtos/pilha.asp#>. Acesso em: 01 dez. 2024.

JESUS, Tuila. **Poluentes Emergentes**. 2020. Disponível em: <http://www.sustentavel.ufu.br/node/483>. Acesso em: 24 nov. 2024.

KRUG, Francisco José; ROCHA, Fábio Rodrigo Piovezani. **Métodos de preparo de amostras Para Análise Elementar**. 2. ed. São Paulo: Sociedade Brasileira de Química, 2019. 590 p. Acesso em: 27 nov. 2024.

LIXIVIAÇÃO. Dicionário Online Priberam. Disponível em: <https://dicionario.priberam.org/lixivia%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 05 nov. 2024.

MANTUANO, Danuza Pereira; ESPINOSA, Denise Croce Romano; WOLFF, Eliane; MANSUR, Marcelo Borges; SCHWABE, Wilfrid Keller. **Pilhas e baterias portáteis: legislação, processos de reciclagem e perspectivas**. Revista Brasileira de Ciências Ambientais, Rio de Janeiro, v. 341, n. 21, p. 1-13, 30 set. 2011. Disponível em: [https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes\\_RBCIAMB/article/view/341](https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/341). Acesso em: 03 nov. 2024.

PERILLO, Bruna. **Pilhas – Definição, funcionamento, componentes e principais exemplos**. Disponível em: <https://conhecimentocientifico.r7.com/pilhas/>. Acesso em: 6 de dez. de 2024.

REIDER, Nívea Maria Vega Longo e GÜNTHER, Wanda Maria Risso et al. **Impactos sanitários e ambientais devido aos resíduos gerados por pilhas e baterias usadas** (2002). In: CONGRESO INTERAMERICANO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL, 28., 2002, Cancún. XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental: gestión inteligente de los recursos naturales; [anais em CD-ROM]. Cancún: Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2002. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001347745>. Acesso em: 22 out. 2024.

RIBEIRO, Luiz Carlos de Santana; FREITAS, Flavio da Silva; CARVALHO, Julia Trindade Alves; OLIVEIRA FILHO, João Damásio de. **Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem: um estudo exploratório nas cooperativas de catadores de material reciclável do estado do Rio de Janeiro**. Nova Economia, Belo Horizonte, v. 24, p. 191-214, abr. 2014.

TME ELECTRONIC COMPONENTS. **Pilhas de lítio, alcalinas, de prata e outras – quais são os tipos de pilhas?**. Disponível em: <https://www.tme.com/br/pt/news/library-articles/page/40692/Pilhas-de-litio-alcalinas-d-e-prata-e-outras-qualis-sao-os-tipos-de-pilhas/>. Acesso em: 6 de dez. de 2024.