

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA**  
**ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST**  
**CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

**FERNANDO ARAÚJO DE OLIVEIRA**

**RECUPERAÇÃO HIDROMETALÚRGICA DO COBRE A PARTIR DE**  
**PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE COMPUTADORES**  
**DESCARTADOS**

MANAUS

2023

**FERNANDO ARAÚJO DE OLIVEIRA**

**RECUPERAÇÃO HIDROMETALÚRGICA DO COBRE A PARTIR DE  
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE COMPUTADORES  
DESCARTADOS**

**Monografia apresentada ao Curso de  
Graduação em Engenharia Química da Escola  
Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do  
Amazonas, para obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química.**

**Orientador: Prof. Dr. Clairon Lima Pinheiro**

**MANAUS**

**2023**

## Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).  
**Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.**

O48rr Oliveira, Fernando Araújo de  
Recuperação hidrometalúrgica do cobre a partir de  
placas de circuito impresso de computadores descartados /  
Fernando Araújo de Oliveira. Manaus : [s.n], 2023.  
76 f.: color.; 7 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -  
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.  
Inclui bibliografia  
Orientador: Pinheiro, Clairon Lima

1. Lixo eletrônico. 2. Cobre. 3. Hidrometalurgia. 4.  
Eletroeletrônico. 5. PCI. I. Pinheiro, Clairon Lima  
(Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III.  
Recuperação hidrometalúrgica do cobre a partir de placas  
de circuito impresso de computadores descartados

**FERNANDO ARAÚJO DE OLIVEIRA**

**RECUPERAÇÃO HIDROMETALÚRGICA DO COBRE A PARTIR DE  
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE COMPUTADORES  
DESCARTADOS**

**Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro, Habilitação em  
Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do  
Amazonas**

**Banca Examinadora:**

*Clairon Lima Pinheiro*

.....  
**Prof. Dr. Clairon Lima Pinheiro – Orientador**

*Aimée Valente*

.....  
**Profa. Me. Aimée Maria Valente da Silva – PUC - Rio**

*Cláudia Cândida Silva*

.....  
**Profa. Dra. Cláudia Cândida Silva – UEA**

**Conceito: 9,8**

**Manaus, 21 de julho de 2023.**

## **DEDICATÓRIA**

A minha mãe e minha avó por serem mulheres inspiradoras.

## AGRADECIMENTOS

A minha mãe por me apoiar nas minhas decisões e por ser a minha base de sustentação, força e vida.

A parte da minha família que me incentivou com palavras e ações pra mostrar que o mundo está nas mãos daqueles que amam e lutam.

Aos meus avós pelo bem-estar e recepção em todos os momentos, principalmente a minha avó Francisca por aquela comida saborosa no meu primeiro dia de aula.

Aos meus amigos Jéssica Vitória, Matheus Vinícius, João Víctor, Gustavo Zanatta, Julie Lee, Alex Viana e Lucca Fernando, sem vocês a jornada e transformações que ocorreram até aqui não seriam possíveis. E desculpa por todas às vezes que usei o ouvido de vocês para desabafar sobre a monografia.

A dona Teresa por ter me recebido e me apoiado nos tempos mais difíceis.

Ao grupo de pesquisa Crowfoot de Métodos de Raios-X por terem me aceitado no começo da jornada da pesquisa e por terem me formado quanto ao ser pesquisador.

A professora doutora Cláudia Cândida Silva, líder que me direcionou em tantas áreas da minha vida que seria necessário mais de um artigo científico para explicar.

Aos meus professores do curso de engenharia química da Universidade do Estado do Amazonas por terem me fornecido os conhecimentos para aprender e me interessar a cada dia mais por essa graduação.

Ao professor doutor Clairon Lima Pinheiro pelas aulas e orientação recebida no caminho para a realização dessa etapa final da graduação que se consolidou nesta monografia.

Ao Laboratório de Hidrometalurgia e seus integrantes que foram indispensáveis no desenvolvimento desse trabalho.

Ao DQF e grupos adjacentes por serem minha referência em leitura e escrita. Em especial, a minha panelinha, Flávia Freire, Carol Camargo e, notadamente a minha conterrânea, Emanuelle Maia por sempre ouvirem minhas queixas e tentarem me fazer sentir melhor.

A Sara Kethleen, Silvana Nascimento, Andresa Bassani e Marilene Soares pela ajuda nos experimentos e análises realizadas neste trabalho.

Aos grupos de pesquisa Química Aplicada à Tecnologia - UEA e Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais – IFAM coordenado pelo professor doutor Lizandro Manzato pela disponibilização dos espaços para a realização das análises. Assim como ao Grupo Crowfoot

de Métodos de Raios-X coordenado pela professora doutora Cláudia Cândida Silva pela mobilização e logística no envio das amostras.

A minha banca, professora doutora Cláudia Cândida Silva e professora mestre Aimée Maria Valente da Silva, por aceitar o convite para discutir e falar sobre esse trabalho.

Aos meus colegas de estágio da Suez e Honda por ficarem empolgados ao ouvirem do meu trabalho de pesquisa e me incentivarem nos meus estudos, em especial ao Izaque Oliveira e Marciana Araújo.

A todos aqueles que me acompanharam nessa jornada dentro dos muros dessa escola superior, em especial, Anderson de Sá, Miguel Vanderlei, Luan Ferreira, Catherinne Pimentel e Lucas Gabriel.

Em último, a Deus por sempre ter ouvido as minhas preces e nunca ter falhado quando eu precisava.

*“nossos laços são caixas de papelão cheias de tralha.”*

Victor Heringer

## RESUMO

Descarte, resíduo, rejeito, entulho, detrito, resto, sobra, excremento. Seja qual for o nome, o lixo sempre foi um problema da humanidade desde os primórdios. Com a sedentarização do homem pré-histórico e, mais tarde, o conjunto de fatores denominados revolução industrial, produção em cadeia e aumento do nível de consumo, o grau de produção de lixo escalonou para níveis alarmantes. Destaca-se entre eles o lixo eletrônico, que são resíduos compostos por circuitos ou componentes elétricos com uma bateria ou conexão elétrica. Nesse tipo de rejeito, é usual encontrar o que se denomina placa de circuito impresso (PCI) que é base de qualquer eletroeletrônico. As PCIs possuem em sua estrutura circuitos metálicos onde o principal componente é o cobre. Dessa forma, visto a necessidade da reintrodução dos rejeitos eletrônicos na cadeia produtiva da sociedade, estudou-se a recuperação hidrometalúrgica do cobre a partir de PCIs de computadores descartados. Foram feitas lixiviações em série, uma ácida seguida por uma ácida com agente oxidante, com volumes finais de 150 mL e 250 mL. O licor resultante das lixiviações foi analisado por um espectrômetro de emissão ótica por plasma acoplado (ICP-OES) e também por um equipamento de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF) que mostrou a presença dos seguintes metais: Ag, Al, As, B, Ca, Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Gd, K, Li, Ni, Pb, Rb, Si, Sn, Ti, Tl e Zn. A PCI *in natura* e as polpas das lixiviações foram analisadas por EDXRF e foram encontrados os seguintes metais: Ag, Al, As, Ba, Br, Ca, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Rb, Si, Sn, Sr, Ti e Tl. Calculou-se a extração do cobre em g de elemento por kg de PCI e encontrou-se os valores de 42,875 g/kg e 82,398 g/kg para os respectivos volumes finais de 150 mL e 250 mL. Além disso, na precipitação dos metais presente no licor da lixiviação, o cobre foi o metal que mais contribuiu para o valor agregado do licor.

Palavras-chave: lixo eletrônico, cobre, hidrometalurgia, eletroeletrônico, PCI.

## ABSTRACT

Discard, residue, reject, rubble, detritus, remainder, leftover, excrement. Whatever the name, garbage has always been a human problem since early days. With the sedentism of prehistoric man and, later, the set of factors called industrial revolution, chain production and increased consumption, waste production grown up to alarming levels. Among them, electronic waste stands out, which is a type of waste composed of electrical circuits or components with a battery or electrical connection. In this class of waste, it is usual to find what is called a printed circuit board (PCB), which is the basis of any electronics. PCBs have metallic circuits in their structure where the main component is copper. Thus, given the need to reintroduce electronic waste into society's production chain, the hydrometallurgical recovery of copper from discarded computer PCBs was studied. Serial leachings were performed, one acid followed by another acid with oxidizing agent, with final volumes of 150 mL and 250 mL. The leach liquors were analyzed by an inductively coupled plasma - optical emission spectrometer (ICP-OES) and also by an energy dispersive x-ray fluorescence (EDXRF) equipment, which showed the presence of the following metals: Ag, Al, As, B, Ca, Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Gd, K, Li, Ni, Pb, Rb, Si, Sn, Ti, Tl and Zn. The PCB *in natura* and the leach pulps were analyzed by EDXRF and the following metals were found: Ag, Al, As, Ba, Br, Ca, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Rb, Si, Sn, St, Ti and Tl. The copper extraction in g of element per kg of PCI was calculated and the values of 42.875 g/kg and 82.398 g/kg were found for the respective final volumes of 150 mL and 250 mL. Furthermore, in the pricing of metals present in the leach liquor, copper was the metal that most contributed to the added value of the liquor.

Keywords: e-waste, copper, hydrometallurgy, electronics, PCB.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de PCIs.....	22
Figura 2 – PCI com componentes eletrônicos.....	22
Figura 3 – Classificação das PCIs.....	23
Figura 4 – Composição das PCIs.....	24
Figura 5 – Diagrama de Pourbaix do cobre a 80°C.....	33
Figura 6 – Fluxograma do processamento das PCIs.....	39
Figura 7 – Placas-mães coletadas no setor de informática da EST.....	40
Figura 8 – Montagem da lixiviação.....	42
Figura 9 – Metais pequenos.....	46
Figura 10 – Plásticos.....	46
Figura 11 – Componentes eletrônicos.....	47
Figura 12 – Placas de circuito impresso.....	47
Figura 13 – Formato das placas cortadas.....	48
Figura 14 – Placa única cortada.....	48
Figura 15 – Placas cortadas em tiras.....	49
Figura 16 – Placas reduzidas ao tamanho mínimo.....	49
Figura 17 – Variação de massa em g para a lixiviação ácida.....	51
Figura 18 – Licor esbranquiçado da lixiviação ácida.....	52
Figura 19 – Variação de massa em g para a lixiviação ácida com agente oxidante.....	53
Figura 20 – Licor azul turquesa da lixiviação ácida com agente oxidante.....	54
Figura 21 – Placas pós-processamento.....	61

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade de reagentes utilizados na lixiviação ácida.....	41
Tabela 2 – Quantidade de reagentes utilizados na lixiviação ácida com agente oxidante...	43
Tabela 3 – Condições de operação do ICP-OES.....	44
Tabela 4 – Massa dos componentes das placas-mães.....	45
Tabela 5 – Medidas médias das PCIs moídas.....	50
Tabela 6 – Massa dos experimentos na lixiviação ácida.....	51
Tabela 7 – Massa dos experimentos na lixiviação ácida com agente oxidante.....	53
Tabela 8 – Concentração dos elementos em g/L no LLS.....	55
Tabela 9 – Concentração dos elementos em g/L no LSP.....	57
Tabela 10 – Composição elementar da PCI <i>in natura</i> e das PLP em % em massa.....	59
Tabela 11 – Composição do licor da lixiviação ácida em % em volume.....	62
Tabela 12 – Composição do licor da lixiviação ácida oxidante em % em volume.....	63
Tabela 13 – Extração média de metais em g/kg de PCI.....	65
Tabela 14 – Valor agregado dos metais extraídos.....	65

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

a.C.	Antes de Cristo
Ag	Prata
Al	Alumínio
Ar	Argônio
As	Arsênio
B	Boro
Ba	Bário
Br	Bromo
°C	Graus Celsius
Ca	Cálcio
Cd	Cádmio
Cl	Cloro
cm	Centímetro
cm <sup>2</sup>	Centímetros quadrados
Cr	Cromo
Cu	Cobre
Cu <sup>+1</sup>	Íon de cobre +1
Cu <sup>+2</sup>	Íon de cobre +2
EDXRF	Fluorescência de raios-x por energia dispersiva
EST	Escola Superior de Tecnologia
EUA	Estados Unidos da América
Fe	Ferro
Fe <sup>3+</sup>	Íon de ferro +3
g	Gramas
Gd	Gadolínio
g/cm <sup>3</sup>	Gramas por centímetro cúbico
g/kg	Gramas por quilograma
g/L	Gramas por litro
H <sup>+</sup>	Íon de hidrogênio +1
Hg	Mercúrio
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	Ácido bórico
H <sub>2</sub> O	Água

H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrogênio
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP-OES	Espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado
K	Potássio
K <sub>3</sub> CuF <sub>6</sub>	Hexafluorocuprato de potássio (III)
KeV	Quiloelétron-volt
kg	Quilograma
kg/t	Quilograma por tonelada
kW	Quilowatt
Li	Lítio
LLS	Licor da lixiviação sulfúrica
LSP	Licor da lixiviação sulfúrica com agente oxidante
L/min	Litros por minuto
M	Molar
mL	Mililitro
mm	Milímetro
Mt	Megatonelada
n°	Número
Ni	Níquel
Ni <sup>2+</sup>	Íon de Níquel +2
Pb	Chumbo
PCI	Placa de circuito impresso
pH	Potencial hidrogeniônico
PLP	Polpa da lixiviação sulfúrica com agente oxidante
PLS	Polpa da lixiviação sulfúrica
PVC	Policloreto de vinila
Rb	Rubídio
s	Segundo
Si	Silício
Sn	Estanho
Sn <sup>+4</sup>	Íon de estanho +4
SnO <sub>2</sub>	Óxido de estanho IV
Sn(OH) <sub>4</sub>	Hidróxido de estanho IV
Sr	Estrôncio

t	Tonelada
Ti	Titânio
Tl	Tálio
US\$	Dólar americano
US\$/t	Dólares americanos por tonelada
XVI	Dezesseis
Zn	Zinco
Zn <sup>2+</sup>	Íon de zinco +2
ZnO	Óxido de zinco
ZnS	Sulfeto de zinco

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	18
2.1 LIXO ELETRÔNICO.....	18
<b>2.1.1 Reciclagem do Lixo Eletrônico</b> .....	20
2.2 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI).....	21
<b>2.2.1 Processos de Reciclagem de PCIs</b> .....	25
2.2.1.1 Processos físicos-mecânicos.....	25
2.2.1.2 Processos químicos-metalúrgicos.....	27
2.3 COBRE.....	28
2.4 HIDROMETALURGIA.....	31
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	38
3.1 MATERIAL.....	38
3.2 VISÃO GERAL DO PROCESSAMENTO.....	38
3.3 COLETA E DESMANTELAMENTO.....	40
3.4 MOAGEM.....	40
3.5 MEDIÇÃO DE PARTÍCULAS MOÍDAS.....	41
3.6 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA.....	41
3.7 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA COM AGENTE OXIDANTE.....	43
3.8 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA POR PLASMA ACOPLADO.....	44
3.9 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X POR ENERGIA DISPERSIVA.....	44
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	45
4.1 MOAGEM E MEDIÇÃO.....	45
4.2 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA.....	50
4.3 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA COM AGENTE OXIDANTE.....	52
4.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA POR PLASMA ACOPLADO.....	54
4.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X POR ENERGIA DISPERSIVA.....	59
4.6 RELAÇÃO DE EXTRAÇÃO DOS METAIS E VALORAÇÃO.....	64
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	67
<b>6 PERSPECTIVAS</b> .....	68

<b>REFERÊNCIAS</b> .....	69
<b>APÊNDICE</b> .....	76
APÊNDICE A – Medição da largura, altura e massa das PCIs.....	76

## 1 INTRODUÇÃO

O lixo tem sido um problema social desde os tempos em que os seres humanos deixaram de ser nômades, uma vez que essa fixação em um determinado local provocava o acúmulo dos dejetos produzidos por aquela comunidade. Com o passar dos anos, novas tecnologias se desenvolveram e com isso houve a criação de novas denominações para os rejeitos produzidos pela sociedade como, por exemplo, o lixo eletrônico (Eigenheer, 2009).

Essa classificação é dada a todo resíduo composto por circuitos ou componentes elétricos com uma bateria ou conexão elétrica. Esses equipamentos são popularmente conhecidos como eletroeletrônicos e hoje estão dispersos em praticamente todo domicílio mundial. Apenas em 2019, cerca de 53,6 Mt desse tipo de resíduo foi produzido pelo globo, onde somente 9,3 Mt foram destinadas a locais de reciclagem (Forti *et al.*, 2020).

Devido à grande presença de metais nesses equipamentos, faz-se interessante a busca por formas de reintrodução desses elementos no ciclo produtivo da indústria. Podendo, dessa forma, reduzir o custo de obtenção de novas fontes de matéria-prima como também evitar o esgotamento total de reservas de produção mineral (Bacic *et al.*, 2011).

Uma parte importante de todos os sistemas eletroeletrônicos é a placa de circuito impresso (PCI), que se trata de uma forma de conexão elétrica entre todos os componentes ali presentes, sendo indispensável para o funcionamento daquele objeto. Um dos principais elementos que a constitui é cobre, que hoje figura entre um dos mais importantes elementos dentro do setor de minerais metálicos, especialmente por sua capacidade condutiva e resistência à corrosão (Ladou, 2006; Silva *et al.*, 2019).

Dentro desse cenário, a hidrometalurgia entra como uma opção para a recuperação do cobre presente nas placas de circuito impresso. Esse processo se utiliza de métodos de dissolução dos metais em meio aquoso com auxílio de agentes químicos, em outras palavras, ocorre a extração do metal de interesse por meio desse procedimento (Ciminelli, 2007).

Essa metodologia vem sendo aplicada a diversos produtos provenientes da mineração com o objetivo de refiná-los, porém, em diversas pesquisas, constatou-se que a mesma é promissora no processo de recuperação dos metais presentes nas placas de circuito impresso, o que levanta a questão de como a mesma funciona para cada metal presente na placa (Almeida *et al.*, 2016; Gomes; Pereira; Leão, 2020; Jorge, 2019).

Com esse escopo, o objetivo geral desse trabalho é investigar a recuperação hidrometalúrgica do cobre das placas de circuito impresso de computadores descartados. Tendo como objetivos específicos os seguintes pontos:

- i. Realizar a lixiviação ácida e lixiviação ácida com agente oxidante das PCIs;
- ii. Analisar os licores e os sólidos obtidos pelo processo lixiviatório;
- iii. Calcular o rendimento da operação;
- iv. Discutir a eficiência da extração do cobre pela hidrometalurgia;
- v. Comparar com outros dados da literatura sobre processos de extração de cobre.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 LIXO ELETRÔNICO

No começo da sociedade humana, diversos grupos étnicos ao redor do mundo viviam em harmonia com a natureza em um nível de demanda compatível com os ciclos de renovação dos recursos ambientais. Destacam-se aqui, os nativos brasileiros que possuíam um conhecimento completo e complexo de agricultura, tendo sistemas plantio que utilizavam fogo controlado, sistemas de coivara, observação de constelações para determinar tempo de plantio, multicultura, ilhas de recursos, entre outros (Alves, 2001; Leonel, 2000).

Com o processo de globalização, possibilitado pela expansão marítima e o desenvolvimento tecnológico das Revoluções Industriais, o ser humano criou e disseminou níveis de consumo irrefreável. As transformações que ocorreram na sociedade provocaram o aumento na produção em diversos setores, pois barateou os custos de manufatura, o que por sua vez permitiu um maior acesso e consumo da população aos produtos. Uma das consequências desse crescimento de consumo é uma maior produção de lixo (Fontenelle, 2017; Zanirato; Rotondaro, 2016).

Segundo Eigenheer (2009), o lixo sempre foi um problema para as sociedades, pois qualquer simples atividade humana gera algum resíduo. Tendo como exemplo a produção de uma refeição, quando se retira uma casca ou se remove os ossos de algum animal, lixo está sendo gerado. Esse descarte foi se diversificando com o decorrer dos anos e, hoje, pode-se classificar esses dejetos de diversas formas, onde os termos mais populares são lixo doméstico, lixo hospitalar, recicláveis, lixo radioativo, lixo eletrônico, entre outros.

Dentre esses, pode-se destacar o lixo eletrônico, que nas palavras de Forti *et al.* (2020) são uma ampla gama de produtos com circuitos ou componentes elétricos que são energizados por eletricidade ou baterias. É válido destacar que praticamente todas as residências, centros comerciais e indústrias possuem algum ou vários equipamentos eletrônicos, sejam eles de pequeno porte, como celulares ou máquinas de cartão de crédito, ou de grande porte, como geladeiras e máquinas industriais.

Em termos de Brasil, destacam-se os televisores. Em 2008, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 95 % das casas contavam com um modelo desse aparelho. Dessa forma, baseando-se em uma estimativa de vida de 15 anos, somente esse tipo de aparelho geraria

205.324 toneladas de lixo eletrônico por ano no Brasil. Valor que tende a aumentar conforme o desenvolvimento da sociedade (Araújo *et al.*, 2012).

Ainda, segundo Forti *et al.* (2020), todos os países em conjunto produziram cerca de 53,6 Mt de lixo eletrônico, nos quais somente 17,4% desse valor foi documentado e separado para processos de reciclagem. Especificadamente nas Américas, a produção de resíduos foi de cerca de 13,1 Mt das quais somente 9,4% foram documentadas e recicladas apropriadamente. No Brasil, estima-se que cerca de 2,143 Mt foram produzidas.

Devido à grande variabilidade de objetos declarados como lixo eletrônico, faz-se necessária uma classificação dos mesmos. Segundo Baldé, Forti e Kuehr (2015), eles devem ser agrupados conforme funções aproximadas, composição dos equipamentos em termos de substâncias tóxicas e materiais valorizados e, por fim, semelhante destino final ao ser descartado. Além disso, seria adequado uma homogeneidade no peso do equipamento e assim como no tempo de vida, com o objetivo de simplificar os cálculos quantitativos.

Levando em consideração a classificação dada pela União Europeia, que é uma das mais promissoras nesse ramo, temos que os equipamentos podem ser classificados como (European Union, 2003):

- i. Grandes equipamentos domésticos;
- ii. Pequenos equipamentos domésticos;
- iii. Equipamentos de informática e telecomunicação;
- iv. Equipamentos de consumo;
- v. Lâmpadas;
- vi. Ferramentas elétricas e eletrônicas;
- vii. Brinquedos e equipamentos esportivos;
- viii. Equipamentos médicos;
- ix. Sistemas de monitoramento e controle;
- x. Distribuidores automáticos.

Entretanto, desde 2012, a mesma faz uso de uma classificação mais simples, que é encontrada no dia a dia e separam os equipamentos nas seguintes categorias (European Union, 2012):

- i. Equipamentos de troca térmica;
- ii. Telas e monitores;

- iii. Lâmpadas;
- iv. Grandes equipamentos;
- v. Pequenos equipamentos;
- vi. Pequenos equipamentos de informática e telecomunicação.

O Brasil não possui classificação nesse quesito, sendo que os estudos são feitos conforme cada equipamento, como demonstrado por Abbondanza e Souza (2019), Araújo *et al.* (2012) e Rodrigues, Gunther e Boscov (2015).

Apesar da sua classificação complexa, segundo Gerbase e Oliveira (2012), os principais componentes do lixo eletrônico são ferro/aço (47,9%), plásticos (20,67%), metais não-ferrosos (12,7%), vidro (5,4%), placas de circuito impresso (3,1%) e madeira (2,6%). É importante ressaltar as placas de circuito impresso, uma vez que elas são base para todo o funcionamento dos equipamentos eletrônicos e dessa forma indispensáveis para o seu uso.

### **2.1.1 Reciclagem do Lixo Eletrônico**

Segundo Forti *et al.* (2020), 82,5% do lixo eletrônico produzido no mundo em 2019 não foi coletado, catalogado e destinado corretamente para centros de reciclagem. Isso evidencia a grande lacuna presente no globo quanto aos processos de reciclagem.

Ainda conforme Forti *et al.* (2020), a Europa é o continente com a maior porcentagem de reciclagem de lixo eletrônico com 42,5% dele sendo coletado, classificado e tratado de forma correta. Isso ocorre porque foi nesta região que surgiu uma das primeiras políticas de tratamento desse resíduo a partir da DIRECTIVE 2002/96/EC da União Europeia (2003) que fundamentou conceitos para os primeiros passos do processo de classificação, coleta, tratamento e recuperação desse tipo de material.

Além da União Europeia, outros 78 países possuem alguma forma de legislação ou decreto acerca da manipulação do lixo eletrônico. Nestes países, incluem-se China, Índia, Estados Unidos, Brasil e outros que representam uma cobertura de 71% da população mundial. Entretanto, é necessário pontuar que nem sempre as legislações são eficientes em responder a necessidade do manejo do lixo eletrônico (Forti *et al.*, 2020).

O desenvolvimento socioeconômico também é um fator importante no gerenciamento desse resíduo, pois o processo de reciclagem para esse tipo de material possui um alto custo monetário

levando países desenvolvidos exportarem seus rejeitos para serem tratados em países em desenvolvimento como a China, Índia e Paquistão. Somente em 2012, a China recebeu cerca 70% de todo lixo eletrônico produzido no mundo (Li; Eksteena; Oraby, 2018; Zhang; Schnoor; Zeng, 2012).

Outro aspecto a ser analisado é evidenciado por Dias, Bernardes e Huda (2022) que mostram que os países Brasil, México, África do Sul, Nigéria, Indonésia e Austrália atuam no processo de beneficiamento do lixo eletrônico. Esses países recebem material com baixo valor agregado, separam os componentes e organizam o envio para outras empresas em outros países para o tratamento especializado desses componentes que adquirem um alto valor agregado na exportação. Dessa forma, os países citados funcionam como um agregador de valor desse resíduo.

Entrado no território brasileiro, a gestão do lixo eletrônico está presente dentro da Política Nacional de Resíduos Sólidos instituída pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 e regulamentada pelo Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Por essas legislações, foi estabelecido o sistema de logística reversa para esse rejeito, ou seja, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes são obrigados a estabelecer um sistema de coleta, armazenagem e tratamento para o lixo eletrônico priorizando a reciclagem (Brasil, 2010; 2020).

Apesar da existente legislação, o Brasil ainda não possui um sistema de logística reversa eficiente o que faz com que grande parte do lixo eletrônico seja disposto em aterros sanitários juntamente com o lixo doméstico. Entretanto, os catadores aparecem como parte do sistema informal de reciclagem onde eles atuam coletando apenas os componentes que possuem maior valor agregado sendo eles PCIs, disco rígido e processadores (Abbondanza; Souza, 2019; Dias; Bernardes; Huda, 2022).

## 2.2 PLACA DE CIRCUITO IMPRESSO (PCI)

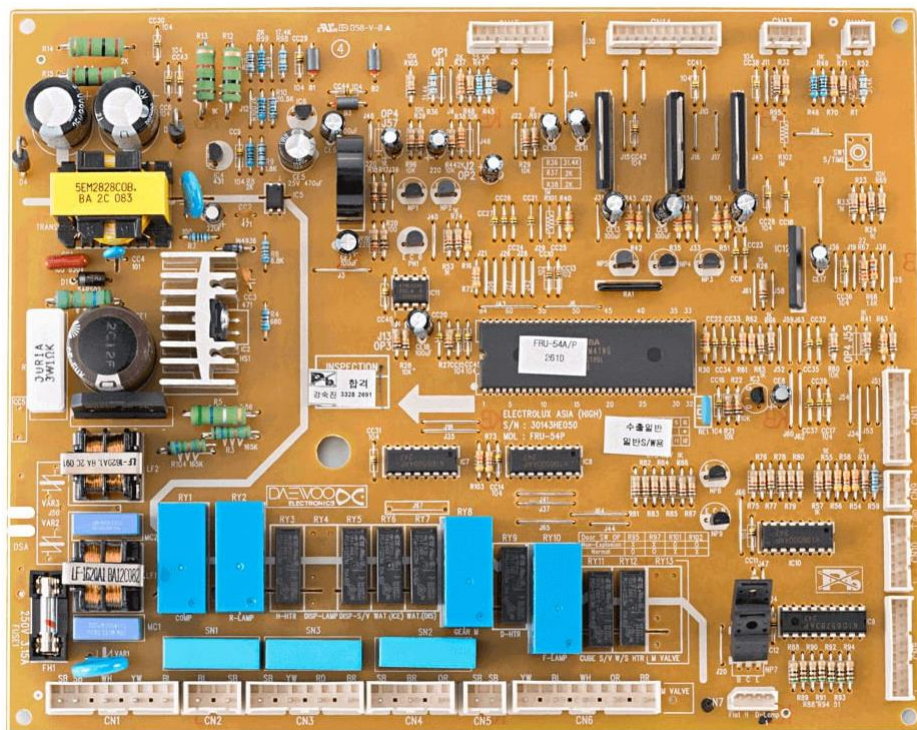
As placas de circuito impresso, como exemplificado nas Figuras 1 e 2, são estruturas nas quais componentes eletrônicos como resistores, capacitores, circuitos integrados, transistores, diodos e componentes magnéticos são instalados. Sua principal função é conectar eletricamente todos esses elementos que são distribuídos na placa através de uma trilha de cobre. Elas surgiram como uma forma de substituição das pontes de terminais (Ladou, 2006; Melo; Rios; Gutierrez, 2001).

Figura 1 – Exemplo de PCIs



Fonte: AWA Refiners Limited (2016)

Figura 2 – PCI com componentes eletrônicos



Fonte: Electrolux (2022)

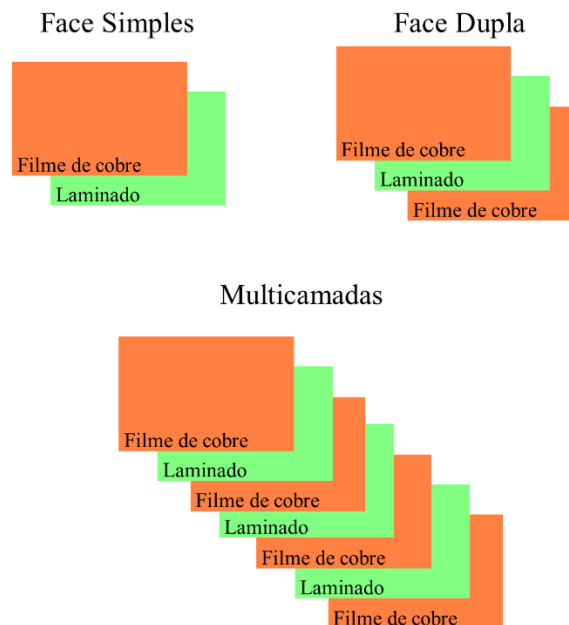
Com o desenvolvimento tecnológico, as placas se tornaram praticamente o componente básico de todo equipamento eletroeletrônico o qual sem a mesma não é capaz de funcionar. Além do seu tamanho reduzido, ela conta com uma flexibilidade que permite a adequação da PCI em cada projeto, porém essa mesma vantagem acaba gerando uma diversidade nos tipos de placas e na sua composição o que pode dificultar o processo de reciclagem (Melo; Rios; Gutierrez, 2001).

Um dos locais mais proeminentes para a observação das PCIs são os gabinetes de computadores, onde existem um conjunto das mesmas, como na placa mãe, na placa de rede, na placa de modem e na placa de vídeo. Em 2021, no mercado mundial, todas as PCIs geraram uma participação expressiva no mercado de US\$ 80,3 bilhões, o que demonstra o quão importante ela é para o comércio global (Gerbase; Oliveira, 2012; Prismark, 2022).

Com a redução do tamanho dos elementos constituintes das PCIs e da sua própria estrutura, foi aplicado um aumento no grau de integração no circuito e, dessa forma, a placa passou a desempenhar mais funções. A junção de mais componentes sobre as placas provocou o surgimento de novas classificações para as PCIs. Atualmente, as mesmas podem ser categorizadas conforme as suas camadas como: face simples, face dupla e multicamadas (Melo; Rios; Gutierrez, 2001; Moraes, 2011).

As placas de circuito impresso de face simples são aquelas onde somente um dos lados do laminado é revestida com cobre, já na placa dupla os dois lados do laminado são revestidos com cobre. Por fim, as multicamadas são aquelas onde o cobre é depositado entre várias camadas de laminado. Na Figura 3, pode-se observar uma representação esquemática das três tipologias. Vale ressaltar que esse laminado difere para cada eletroeletrônico. Por exemplo, os celulares utilizam fibras de vidro reforçadas com resina epóxi, enquanto as placas de televisores utilizam celulose reforçada com resina fenólica (Gerbase; Oliveira, 2012; Moraes, 2011).

Figura 3 – Classificação das PCIs



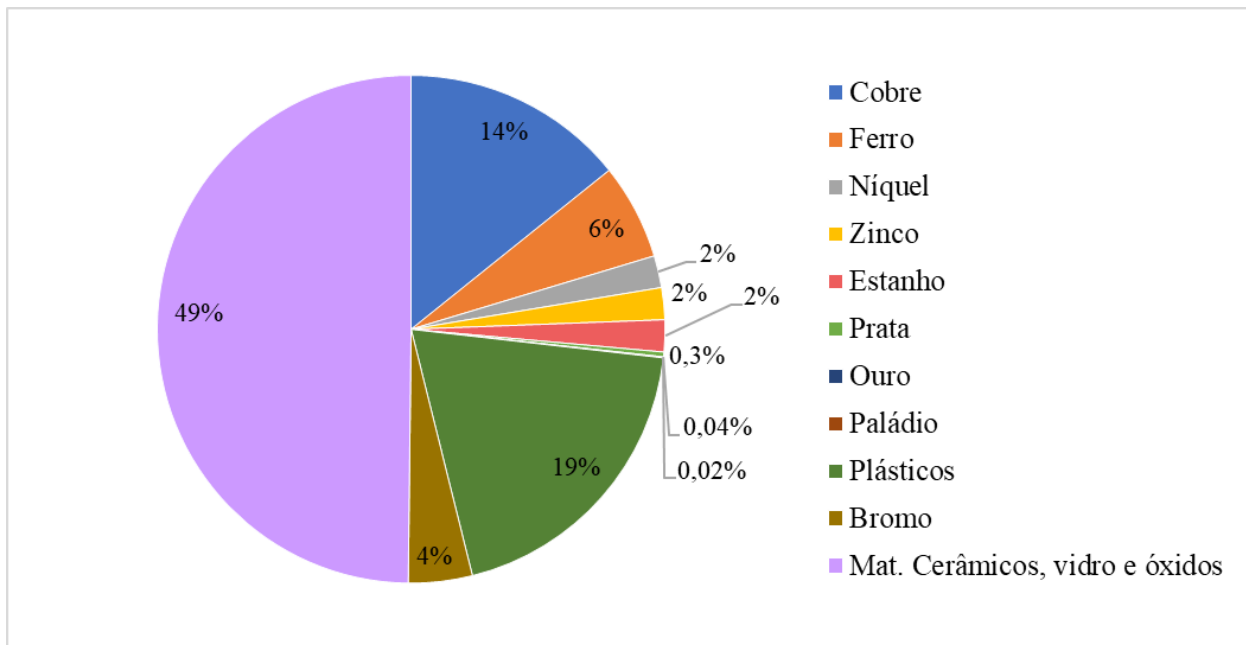
Fonte: Adaptado de MORAES (2011)

O estudo das PCIs descartadas se torna interessante porque são nelas que se encontram a maior parte do valor agregado dos eletrônicos. Em outras palavras, o conjunto de metais valiosos contido na placa torna sua recuperação atraente para a indústria. Isso se dá, pois, a concentração proporcional de metais valiosos nas PCIs é superior ao encontrados nos seus respectivos minérios brutos (Silva, M. *et al.*, 2020).

Um exemplo dessa maior concentração foi discutido por Caldas *et al.* (2019) em relação ao ouro. Os autores destacaram que nas placas estudadas existiam concentrações em massa de até 0,06%, enquanto nas jazidas brasileiras o teor de ouro nos minérios é em torno de 0,0002%. Em termos proporcionais, as PCIs contêm 300 vezes mais ouro.

Pelo trabalho de Gerbase e Oliveira (2012), sabe-se que os principais componentes em relação a massa das placas de circuito impresso são materiais cerâmicos, vidros e óxidos (49%), metais (28%), plásticos (19%) e bromo (4%). Suas respectivas porcentagens em massa podem ser vistas na Figura 4.

Figura 4 – Composição das PCIs



Fonte: Adaptado de Gerbase e Oliveira (2012)

Percebe-se que o metal mais presente na placa é o cobre com valores médios de 14 % em massa. Isso ocorre principalmente porque é o cobre que fornece as trilhas que ligam os dispositivos que estão agregados em cima da placa, ou seja, ele que fornece a ligação elétrica que permite o funcionamento da placa (Gerbase; Oliveira, 2012).

Para além do cobre, os outros metais existentes nas PCIs possuem alto valor comercial. Pela cotação do London Metal Exchange, por exemplo, o níquel, o zinco e o estanho estão precificados por tonelada em US\$ 24.395,00, US\$ 3.048,00, US\$ 24.570,00, respectivamente. Isso torna a recuperação desses metais interessante tanto do ponto de vista econômico para a indústria que não teria que investir na obtenção desses metais das reservas naturais quanto pelo aspecto ambiental uma vez que o meio ambiente não seria afetado pelas atividades mineradoras (London Metal Exchange, 2023a, 2023b, 2023c).

### **2.2.1 Processos de Reciclagem de PCIs**

Os processos de reciclagem de PCIs são divididos em duas categorias principais: os processos físicos e os processos químicos que também podem ser chamados de processos mecânicos e processos metalúrgicos, respectivamente. Os processos físicos-mecânicos utilizam as propriedades físicas para separar as frações plásticas e metálicas das PCIs, já os processos químicos-metalúrgicos fazem parte de extração e refino dos metais obtidos das PCIs (Gerbase; Oliveira, 2012; Jorge, 2019).

Antes de passar pelos processos de reciclagem, as placas que são recebidas pelos sistemas de coleta necessitam passar por uma preparação que se trata do desmantelamento, ou seja, a retirada dos componentes eletrônicos que estão acoplados nas placas. Essas estruturas são encaminhadas para outros setores conforme seu valor agregado e as substâncias perigosas que podem estar associadas a elas (Li; Eksteena; Orabv, 2018; Moraes, 2011).

#### **2.2.1.1 Processos físicos-mecânicos**

O processamento mecânico envolve diversas operações unitárias que se iniciam na redução do tamanho das placas para melhor aproveitamento nas etapas posteriores e, a partir disso, se debruçam na separação do material a partir das características física do material como densidade, condutividade elétrica, magnetismo e tamanha de partícula (Jorge, 2019; Silva, C. *et al.*, 2020).

O primeiro processo é a cominuição que reduz o tamanho das partículas para melhorar a liberação dos metais e também prover o tamanho de partícula necessário para as próximas etapas, além de também diminuir o volume para transporte. É a etapa onde existe o maior consumo de

energia elétrica e por isso dever ser pensando a fim de evitar desperdícios (Gerbase; Oliveira, 2012; Kumar; Holuszko; Song, 2022).

As técnicas utilizadas para reduzir as partículas podem ser de impacto, atrito ou compressão. As principais máquinas utilizadas na redução de partículas são os moinhos de martelos e de facas. A cominuição também é dividida em britagem e moagem, ou fragmentação final. Na primeira atinge-se partículas de tamanho superior a 1 mm, já na segunda granulometria abaixo de 1 mm (Gerbase; Oliveira, 2012; Moraes, 2011).

Após a cominuição, usualmente faz-se a classificação granulométrica que é uma metodologia para separar as partículas com tamanhos diferentes por meio da passagem da amostra por uma série de peneiras. Isso é feito pois cada equipamento subsequente tem seu grau de eficiência máximo em determinadas granulometrias, além disso, segundo Kumar, Holuszko e Song (2022), os metais se acumulam nas frações mais finas da granulometria (Moraes, 2011).

O primeiro método físico de concentração utilizado para PCIs é a separação gravimétrica. Ela se utiliza da densidade, forma e tamanho das partículas que através de um fluido, como a água ou ar, são separadas pelas forças gravitacionais. Ele possui baixo custo e bons resultados. Além disso, existem alguns tipos de separação gravimétrica, sendo elas: as mesas separadoras, hidrociclonagem, jigagem, entre outros. A seleção de qual tipo será utilizado depende do material de trabalho e tamanho de partícula (Gerbase; Oliveira, 2012; Jorge, 2019).

A próxima metodologia utilizada é a separação magnética. Ela faz uso das propriedades magnéticas das partículas para separar as frações ferromagnéticas das não magnéticas através de um campo magnético. As partículas são divididas em três categorias conforme sua interação com o campo magnético, são elas: ferromagnéticos (forte atração), paramagnéticos (fraca atração) e diamagnéticos (nenhuma atração) (Jorge, 2019; Moraes, 2011).

Essa metodologia é utilizada principalmente pra concentrar as frações com ferro e níquel que são elementos ferromagnéticos. Outros como cobre, ouro e prata, além de porções plásticas e fibras são repelidas pelo campo magnético se concentrando na parte não magnética. Por fim, platina, manganês e tungstênio são paramagnéticos e ficariam também na porção do concentrado magnético (Gerbase; Oliveira, 2012; Kumar; Holuszko; Song, 2022).

Por fim, tem-se também a separação eletrostática que fragmenta as porções através da condutividade elétrica classificando-as em condutoras ou não condutoras. Esse método é bastante utilizado para separar metais condutores, como cobre, chumbo, estanho, dos materiais cerâmicos e

poliméricos. Existem três tipos de separação eletrostática mais conhecidos, sendo eles separação Corona, separação por correntes Eddy e separação triboelétrica. Desses, a primeira é a mais utilizada pela sua eficácia principalmente em partículas entre os 0,1 e 5 mm de tamanho (Gerbase; Oliveira, 2012; Jorge, 2019; Moraes, 2011).

### 2.2.1.2 Processos químicos-metalúrgicos

O processamento químico, geralmente, é a etapa que sucede o processamento mecânico. Através de reações químicas, consegue-se extrair metais de interesse e também os refinar. Essa etapa é dividida em três ramos principais: os pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos e biometalúrgicos. Além disso, elas também podem ser combinadas para um rendimento maior na extração do elemento foco (Jorge, 2019; Silva, C. *et al.*, 2020).

Começando com os processos pirometalúrgicos, o radical grego *pyrós* significa fogo que é uma das principais formas de fornecer calor a um sistema. Daí vem esse método que se caracteriza pelo uso de altas temperaturas para o processamento das PCIs. Alguns métodos utilizados nessa etapa são a fundição, combustão, pirólise, processamento de sal fundido e técnicas piroquímicas (Cegalla, 2020; Holuszko *et al.*, 2022; Moraes, 2011).

Esse processamento é principalmente usado para a eliminação dos materiais poliméricos e outros materiais orgânicos que estejam presente nas PCIs, pois durante o aquecimento esses componentes são degradados termicamente através da quebra das ligações químicas das cadeias orgânicas promovidas pelo calor (Jorge, 2019; Moraes, 2011).

As principais desvantagens da pirometalurgia são o alto consumo energético necessário para o aquecimento do sistema que geralmente é feito com combustíveis fósseis e também a formação de gases tóxicos derivados da pirólise das placas como a formação de dioxinas que são liberadas pela queima de polímeros clorados, entre eles, o policloreto de vinila (PVC) (Abdelbasir *et al.*, 2018; Gerbase; Oliveira, 2012).

Os processos hidrometalúrgicos são caracterizados pela dissolução dos metais através de reações química em meio aquoso. As principais soluções usadas são derivadas do ácido sulfúrico, ácido clorídrico, ácido nítrico e dos álcalis. Em comparação com a pirometalurgia, esse método promove a economia de energia e uma menor poluição do meio ambiente (Abdelbasir *et al.*, 2018; Gerbase; Oliveira, 2012; Silva, C. *et al.*, 2020).

Apesar de ter alta eficácia e baixo custo em pequena escala, uma das desvantagens apresentadas nesse processo é relativo ao aumento para grandes dimensões, pois em larga escala resultaria na necessidade de grandes volumes de solução químicas bem como o manuseio dessas soluções pode acarretar danos humanos e ambientais (Abdelbasir *et al.*, 2018; Jorge, 2019).

Por fim, os processos biometalúrgicos são aqueles que se utilizam das interações entre os microrganismos e as placas para recuperar os metais. Ela se trata de uma alternativa de baixo custo operacional, energético e com menor impacto ambiental. Seu gargalo se encontra no tempo de reação necessário para que se ocorra a extração dos metais das PCIs (Gerbase; Oliveira, 2012; Jorge, 2019).

Os estudos feitos com esse processo utilizaram diversos microrganismos, entre eles as algas, bactérias, leveduras e fungos. Algumas espécies que obtiveram destaque foram as bactérias: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans*, *Leptospirillum ferrooxidans*, e os fungos: *Penicillium* e *Aspergillus niger*. Pesquisas demonstraram que nas apropriadas condições de cultivo, mais de 90% dos metais foram extraído pelos espécimes (Abdelbasir *et al.*, 2018; Lederer; Pollmann, 2022).

Um exemplo de biometalurgia foi o estudo conduzido por Brandl, Bosshard e Wegmann (2001) que relatou a lixiviação pelos fungos *Aspergillus niger* e *Penicillium simplicissimum* de 65% de cobre e estanho e 95% de alumínio, níquel, chumbo e zinco de PCIs. E também a lixiviação pelas bactérias *Thiobacillus thiooxidans* e *Thiobacillus ferrooxidans* de mais de 90% de cobre, zinco, níquel e alumínio.

### 2.3 COBRE

O cobre é um dos metais mais antigos descobertos e trabalhados pelo homem. Os achados metálicos pré-históricos que continham cobre em sua composição datam de aproximadamente 3300 a 3150 a.C. Além disso, dentro da subdivisão clássica da Idade dos Metais, o cobre está presente como uma delas, sendo o primeiro grande propulsor para o desenvolvimento de técnicas de manejo das ligas metálicas (Navarro, 2006; Rodrigues; Silva; Guerra, 2012).

O cobre que possui número atômico 29 é usualmente encontrado nas reservas na forma dos minerais calcopirita, calcocita e malaquita. Dentre estes, a calcopirita é mais abundante e economicamente relevante para a extração desse metal. Segundo o Serviço Geológico dos Estados

Unidos (2021), as principais reservas desse metal se encontram no Chile, Peru, Austrália, Rússia e México, porém os principais países produtores são Chile, Peru, China, Congo e Estados Unidos (Doebrich, 2009; Rodrigues; Silva; Guerra, 2012).

Em sua forma metálica, ele é dúctil, maleável, de coloração avermelhada, cuja configuração eletrônica é  $[\text{Ar}]3d^{10}4s^1$ . Outras características são seu ponto de fusão em  $1.083\text{ }^\circ\text{C}$ , densidade igual a  $8,96\text{ g/cm}^3$  (a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ), resistividade elétrica de  $1,673 \times 10^{-6}\text{ ohm.cm}$  (a  $20^\circ\text{C}$ ). O mesmo possui excelente deformabilidade, boa resistência à corrosão, resistência mecânica, características de fadiga satisfatórias, boa usinabilidade e cor decorativa (Companhia Siderúrgica de Tubarão, 1996; Rodrigues; Silva; Guerra, 2012).

Quando em compostos, encontra-se em dois níveis de oxidação, sendo eles +1 e +2, porém, em soluções aquosas, o  $\text{Cu}^{+1}$  tende a desproporcionar e assim formar cobre sólido e  $\text{Cu}^{+2}$ . Além disso, já foram documentadas situações onde é possível visualizar estados de oxidação +3 que ocorre em óxidos trinários com a presença de um elemento eletropositivo como o  $\text{K}_3\text{CuF}_6$ . Na maior parte dos casos, os sais de cobre +1 são diamagnéticos, insolúveis e possuem cor branca, ao passo que os de +2 inclinam-se a seres paramagnéticos, solúveis e coloridos (Atkins; Jones, 2012; Burdett; Sevov, 1995).

No ambiente, o cobre é pouco reativo podendo até ser encontrado na sua forma metálica nas minas. Quando em contato com o ar, tende a formar um composto esverdeado decorrente de sua lenta reação com o oxigênio, dando origem ao que se conhece como pátina. Essa substância adere à superfície do objeto, oferecendo uma proteção contra um processo corrosivo mais profundo. Cita-se o exemplo clássico da Estátua da Liberdade que possui uma cor esverdeada devido a essa reação (Atkins; Jones, 2012; Borges *et al.*, 2020).

Devido a essas características, esse elemento é bastante requerido pela indústria. Atualmente, as principais formas de produção de cobre metálico ocorrem por dois processos: os pirometalúrgicos e os hidrometalúrgicos. A primeira operação está relacionada com o uso de altas temperaturas, cerca de  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ , durante a produção, enquanto a segunda diz respeito a extração do metal de interesse com auxílio de soluções aquosas de ácidos e bases. Vale ressaltar que nesse último processo, o cobre deve passar por um processo eletroquímico para que se possa obter o metal sólido (Atkins; Jones, 2012; Havlík, 2008; Rodrigues; Silva; Guerra, 2012).

Ao se falar de indústria, é necessário falar acerca das aplicações que o cobre possui dentro desse setor. Devido a sua baixa resistividade elétrica, ele é um ótimo condutor de eletricidade, além

disso possui uma ótima resistência à corrosão, sendo aplicado na produção de cabos condutores aéreos, linhas telefônicas, motores geradores, transformadores, fios esmaltados, barras coletoras, contatos, fiação para instalações domésticas e industriais, entre outros (Companhia Siderúrgica de Tubarão, 1996; Doebrich, 2009).

Uma das mais importantes propriedades do cobre é sua alta capacidade em formar ligas metálicas com outros elementos. Hoje, já se conhece mais de mil ligas contendo esse elemento, que são aplicadas em diversos setores, como o automobilístico, eletrônico, amálgamas, aviação e confecção de joias. Devido a sua história, destacam-se aqui duas ligas: o latão e o bronze. O primeiro é formado da combinação de cobre com zinco, enquanto o segundo se trata da junção de cobre com estanho (Doebrich, 2009; Rodrigues; Silva; Guerra, 2012).

O latão foi descoberto na Palestina por volta de 1440 a.C. quando se fundiu cobre com zinco e observou-se que se obtinha um material mais durável que o metal puro. O zinco contido na base de cobre pode variar de 5 a 35% conforme a necessidade do produto fabricado. Essa liga é aplicada principalmente na produção de bijuterias, cápsulas para cartuchos de armas, radiadores automotivos, instrumentos musicais, placa de componentes eletrônicos e moedas (Callister; Rethwisch, 2018; Rodrigues; Silva; Guerra, 2012).

Já o bronze é uma das ligas mais antigas existente na história da humanidade. Descoberto pelos egípcios por volta de 3000 a.C., ela vem sendo estudada e desenvolvida até os tempos modernos. O teor de estanho pode variar de 1 até 10%, além de serem adicionados outros elementos para melhorar as propriedades da liga. Ela é principalmente usada quando é necessário a combinação de alta resistência a corrosão e boas propriedades de tração como em conexões de vapor, anéis de pistão e engrenagens (Callister; Rethwisch, 2018; Rodrigues; Silva; Guerra, 2012).

É válido ressaltar uma aplicação que se relaciona diretamente com as PCIs, o uso do cobre nos sistemas eletroeletrônicos. Devido sua baixa resistividade elétrica e sua resistência a corrosão, o cobre é utilizado na transmissão de eletricidade em dispositivos que vão desde equipamentos domésticos pequenos, como liquidificadores e sanduicheiras, até aplicações em sistemas de altas voltagem, como nas linhas de transmissão de eletricidade (Munchen; Dias; Veit, 2022; Schlesinger *et al.*, 2022).

Especificamente nas PCIs, o cobre é o metal usado no filme que recobre o material laminado atuando como conector elétrico entre os componentes que irão ser dispostos na placa, ou seja, esse elemento cria os caminhos físicos para que os comandos dados nos eletrônicos em formas de pulsos

elétricos possam ser dispensados para suas respectivas áreas. Dessa forma, o equipamento é capaz de funcionar e ser utilizado para o que foi criado (Gerbase; Oliveira, 2012).

Visto que o cobre possui tantas propriedades e aplicações dentro da sociedade, ele é um dos metais mais valorizados em relação ao seu preço. Segundo a London Metal Exchange (2023d), a tonelada do cobre custa cerca de US\$ 8.509,00 ficando atrás somente de metais mais raros como o níquel, cobalto e estanho. Dessa forma, além da mineração presente no mundo, também existem indústrias voltadas para a recuperação de cobre a partir de sucatas com o objetivo de obter outras fontes para esse metal a fim de não ficar dependente exclusivamente da extração mineral.

Somente nos Estados Unidos da América (EUA) em 2016, recuperou-se cerca de 839.000 t desse metal, o que corresponde a 33% do suprimento de cobre desse país. Esse material recuperado foi usado principalmente na fabricação de 30 moinhos de latão, 13 moinhos de fio-máquina e em 500 fábricas de produtos químicos, fundições e fabricantes diversos nos EUA. Observa-se com isso que se trata de uma indústria promissora e que reduz o custo de obtenção do cobre uma vez que o mesmo seria obtido por processos de mineração (Flanagan, 2021).

## 2.4 HIDROMETALURGIA

A hidrometalurgia é conhecida por abranger os processos de extração de metais na qual a etapa de separação do metal de interesse da sua matéria-prima é realizada por reações de dissolução em meio aquoso. Esses processos são comumente usados dentro da indústria de mineração para refino de elementos específicos a partir de minérios, temos como exemplo as produções de alumina, ouro, urânio, zinco, terras-raras, entre outros (Ciminelli, 2007; Gupta, 2003).

Esses processos de extração tiveram início com os alquimistas quando os mesmos tentaram transmutar metais em ouro, porém essas técnicas somente foram desenvolvidas para a correta utilização por volta do século XVI na Alemanha e na Espanha. Nestes países, obtinha-se cobre através da oxidação e dissolução pela ação da água da chuva e do ar livre. A modernização dessas metodologias ocorreu apenas ao serem descobertos dois processos: a cianetação, processo para tratamento de minérios de ouro, e o processo Bayer para produção de alumina (Habashi, 2005).

Atualmente, o processo hidrometalúrgico pode ser dividido em quatro grandes setores, sendo eles: a preparação, a lixiviação, a purificação e a recuperação do metal. Dentro desses tópicos, podem ser utilizados diferentes metodologias conforme a matéria-prima utilizada e o

elemento de interesse a ser extraído, além disso, se o processo de lixiviação tiver um bom desempenho seletivo, a etapa de purificação pode ser retirada (Souza, 2013).

Pode-se designar preparação como um conjunto de etapas para adequar propriedades como a granulometria, a composição, a natureza química e a porosidade da matéria-prima de modo que, ao entrar no processo seguinte, se possa ter um melhor aproveitamento da reação de dissolução da matéria-prima. Além disso, em alguns casos, faz-se necessárias modificações químicas no minério para a obtenção de um processo com maior rendimento como é o caso da ustulação do zinco que converte ZnS em ZnO para ser utilizado na etapa adjacente (Ciminelli, 2007).

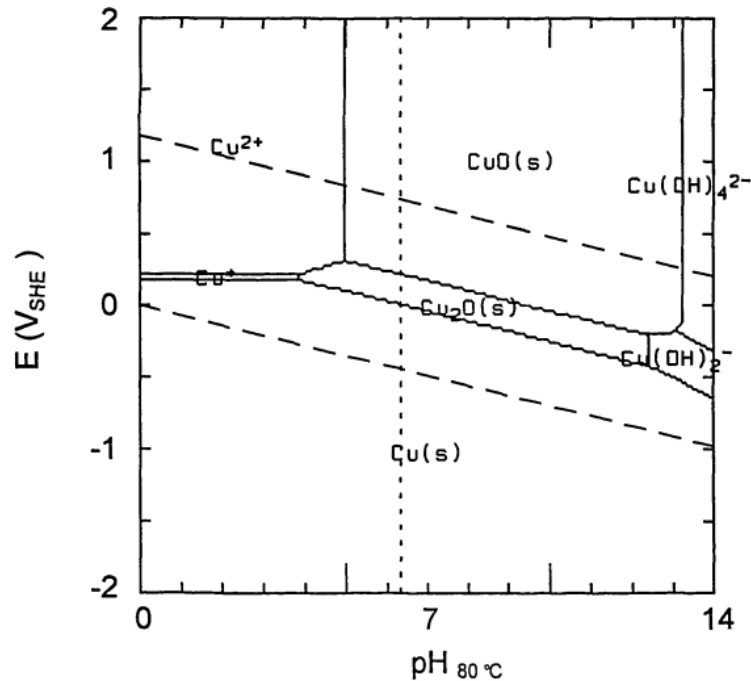
As etapas de preparação podem ser a cominuição, classificação, concentração ou separação sólido-líquido. Vale destacar que esses processos tem como objetivo facilitar a extração do metal. A cominuição, por exemplo, consiste na utilização de maquinários como moinhos ou britadores para reduzir o tamanho da partícula e, dessa forma, obter-se uma maior área superficial para a reação com a solução aquosa (Souza, 2013).

A lixiviação é uma das etapas mais importantes do processo hidrometalúrgico. Ela trata-se da etapa de dissolução do elemento de interesse, o qual se deseja extrair de uma determinada matéria-prima. Este processo é feito por meio do contato de um solvente em meio líquido com o material obtido do processo de preparação, durante o qual esse reagente solubiliza seletivamente a substância que se deseja separar (Gupta, 2003; Leite; Araújo; Santos, 2007).

Esse processo está intimamente ligado com a solubilidade do elemento de interesse no devido solvente que o dissolve até o limite de saturação. As condições gerais de dissolução são derivadas dos dados termodinâmicos presente na forma dos diagramas de Pourbaix. Através desses diagramas, é possível conhecer a região de pH e potencial necessária para a dissolução do elemento de interesse. Um exemplo é demonstrado na Figura 5 que apresenta o diagrama de Pourbaix do cobre a 80°C (Gupta, 2003).

Com os dados presente nesses diagramas, é possível delimitar um dos principais fatores para a eficiência de um processo de lixiviação que é a concentração do solvente (pH). Os outros dois fatores importantes para essa etapa são a temperatura e o tempo de contato. Ambos podem ser obtidos por meio de ensaios laboratoriais, fazendo cruzamento entre diferentes tempos de contato e temperatura até que se obtenha o melhor valor para ambos (Souza, 2013).

Figura 5 – Diagrama de Pourbaix do cobre a 80°C



Fonte: Beverskog e Puigdomenech (1995)

A lixiviação pode ser classificada conforme a natureza do solvente, sendo elas: ácida, básica ou com agentes complexantes. O primeiro utiliza os ácidos na solubilização do metal de interesse, sendo o ácido sulfúrico o mais utilizado. A lixiviação básica é o oposto da anterior, uma vez que utiliza substâncias básicas para o processo de extração, tais como os hidróxidos de sódio e de amônio. Por fim, o último solvente citado forma complexos solubilizados com os íons do elemento a ser extraído (Ciminelli, 2007).

Nos últimos anos, tem-se desenvolvido o que se chama de biolixiviação, ou seja, a utilização de microrganismos para a dissolução dos metais de interesse a partir da matéria-prima. Essa metodologia está sendo desenvolvida como forma alternativa de extração por causa do seu relativo baixo custo e a procura de uma mineração sustentável. Entretanto, os estudos ainda estão muito relacionados somente às matérias-primas sulfetadas (Giese, 2017; Oliveira *et al.*, 2010).

O processo de lixiviação geralmente fornece duas fases distintas, uma líquida na qual está dissolvido o metal de interesse e uma sólida com diversas impurezas. A partir desse momento, começa-se a purificação do material que está sendo trabalhado. A primeira parte é separar a substância sólida da parte líquida que usualmente se chama de licor, onde os principais processos utilizados são a ciclonagem, o espessamento e a filtragem (Gupta, 2003; Souza, 2013).

Logo em seguida, se utilizam processos que visam retirar as impurezas que podem atrapalhar no processo de recuperação do metal e também concentrar o mesmo na solução aquosa em que se encontra. Os principais métodos usados nesse segmento são a precipitação, adsorção em carvão ativado, adsorção em resinas poliméricas de troca iônica e extração por solventes (Ciminelli, 2007; Gupta, 2003).

A precipitação consiste em usar reações químicas para tornar certos íons metálicos em sais insolúveis e, dessa forma, fazer uma separação física entre eles. Os processos adsorptivos utilizam as interações entre moléculas do fluido e da base sólida, seja ela carvão ativado ou resina polimérica, para remover os metais indesejáveis onde o mesmo adere na superfície da base sólida sendo retirado da solução (Nascimento *et al.*, 2020).

No que se refere a extração por solvente, pode-se dizer que a mesma se trata de um processo de transferência de íons específicos de uma solução aquosa pouco concentrada até outra mais concentrada, por meio de uma solução orgânica. Essas duas soluções são imiscíveis entre si o que gera um processo de separação entre elas onde o metal de interesse se encontra na fase orgânica. É importante ressaltar que esse processo pode ser feito com diversos solventes e diversas vezes conforme a necessidade de cada processo (Gupta, 2003).

Por fim, chega-se à etapa de recuperação do metal na qual se divide em dois grandes nichos que são a obtenção na forma de um sal ou na forma metálica. Para a obtenção na forma de sal, existem os processos de precipitação e cristalização, sendo este último o mais simples de ser realizado, já para a forma metálica usa-se processos eletroquímicos como a cementação e a eletrólise. Vale ressaltar que a cementação é utilizada em processos muito específicos, assim os processos de eletrólise são os mais utilizados para obtenção de metais com elevadas purezas (Ciminelli, 2007; Gupta, 2003).

Como já explicado anteriormente, a precipitação faz uso de uma reação química para a obtenção de um sal insolúvel que é facilmente removido da fase líquida, porém neste caso o íon a ser precipitado é o metal de interesse, já a cristalização se utiliza dos fatores de solubilidade do íon presente na solução onde alterando-se fatores como a temperatura o mesmo se cristaliza dentro da solução presente na forma de um sal (Gupta, 2003).

Para recuperação metálica, a cementação é uma das metodologias utilizadas em processos específicos. Ela consiste num processo de troca iônica, onde usa-se um metal menos nobre, como ferro, cobre ou zinco, que o metal de interesse na forma sólida, geralmente ouro ou prata,

insere-se esse componente na solução contendo o íon do metal mais nobre e por uma reação espontânea os íons da forma sólida são liberados na água e os íons da solução substituem os que foram liberados na forma sólida, ou seja, um processo redox (Petrova *et al.*, 2013).

Esse processo tem as vantagens de apresentarem alta eficiência, baixo custo e facilidade de aplicação, entretanto ele não se torna tão prático, pois como relatado por Bas, Yazici e Deveci (2012) para a cementação da prata, o processo libera íons metálicos no licor podendo também contaminar o metal de interesse fazendo-se indispensável outros processos de refino e consequentemente encarecendo a planta de processamento.

A eletrólise é a forma de recuperação mais utilizada para os metais uma vez que pode ser aplicada em vários metais diferentes e é capaz de produzir metais com altos valores de pureza. Ela funciona através da aplicação de uma diferença de potencial em uma célula eletrolítica na qual o cátodo e o ânodo estão inseridos na solução aquosa contendo o metal de interesse. Durante o processo, o mesmo passa a se acumular no cátodo na forma metálica promovendo a recuperação dele (Souza, 2013).

Os principais metais que são obtidos por esse processo são, por exemplo, cobre, níquel, ouro, cobalto e zinco. Apesar de suas ótimas características e rendimento, essa metodologia demanda um consumo de energia muito elevado devido a necessidade de aplicar uma diferença de potencial e isso é diretamente convertido no valor final do produto que chega a ser 23% do total para metais como o zinco (Ciminelli, 2007).

Além da ampla variedade de técnicas apresentadas durante o processo de hidrometalurgia, faz-se necessário destacar os principais fatores que podem alterar a eficiência do processo. Entre eles, pode-se evidenciar: concentração do solvente (pH), tamanho de partícula, tempo de contato, agente lixiviante, temperatura, pressão e agitação. Esses fatores são alterados conforme a matéria-prima de partida e o metal de interesse a partir da matriz (Souza, 2013).

A concentração de solvente, que dentro dos processos hidrometalúrgicos pode ser lida como pH, é um dos fatores mais importantes para a operação. Sabendo-se o pH da solução lixiviante juntamente com os diagramas de Pourbaix de cada elemento químico, é possível prever os produtos da reação de lixiviação. Dessa forma, encaminha-se cada etapa do processo para reduzir o custo de operação, bem como escolher uma metodologia mais específica conforme o metal de interesse (Gupta, 2003).

Como exemplo, Moraes (2011) estudou a lixiviação de cobre, níquel, zinco e ferro a partir de placas de circuito impresso de celulares. Em seu trabalho, foram utilizados três diferentes pHs onde, após os experimentos, foi constatado que o aumento do pH ocasionou a redução da extração dos elementos de interesse. Para o Níquel, a extração em pH 0,5 foi de 100%, enquanto que em pH 1,5 foi de 20%.

Outro fator importante é o tamanho de partícula da matéria-prima a ser empregada na hidrometalurgia, pois é conhecido que quanto maior o contato entre os reagentes, maior o número de colisões entre as moléculas e dessa forma a reação química ocorre mais rapidamente. Como também explica Cremasco (2012), esse tamanho afeta os processos de transferência de massa e calor dentro do sistema que podem tanto aumentar ou diminuir a eficiência do mesmo (Brown; Lemay; Bursten, 2005).

O tempo de contato entre as fases durante o processo lixiviatório é um fator bastante estudado dentro da hidrometalurgia uma vez que determina a eficácia e viabilidade do processo. A velocidade da reação química varia conforme o agente lixivante ou também o microrganismo utilizado no processo podendo ser de apenas algumas horas para semanas conforme o método escolhido (Souza, 2013).

Por exemplo, em Leite, Araújo e Santos (2007) o aumento do tempo de contato da solução de ácido sulfúrico com amostras de minério de cobre oxidado promoveu o aumento da extração do metal de interesse. Além disso, os processos que utilizam microrganismos costumam ser acrescido pelo tempo de adaptação e cultivo dos mesmo o que aumenta o tempo de contato com o material (Jorge, 2019).

O próximo item a ser explanado são os agentes lixiviantes que devem ser escolhidos conforme a matéria-prima de trabalho e o elemento químico de interesse uma vez que cada agente tem um grau de dissolução diferente para cada mineral bem como características seletivas entre os metais. Além disso, é válido ressaltar que alguns metais são mais reativos que outros, como exemplo, o ouro que dificilmente muda seu estado químico em contato com reagentes químicos (Atkins; Jones, 2012; Souza, 2013).

Citando alguns casos: o alumínio é lixiviado da bauxita com hidróxido de sódio, o ouro possui os processos de cianetação, água régia e com tiosulfato, o cobre em minérios oxidados com lixiviação sulfúrica e em PCIs com soluções amoniacaís, o níquel em forma de minérios com

amônia, o zinco a partir de sulfetos pode ser extraído com ácido sulfúrico, entre outros exemplos presente na literatura (Ciminelli, 2007; Habashi, 2005; Jorge, 2019).

A temperatura é um fator fundamental em qualquer reação química uma vez que a elevação da mesma geralmente eleva a velocidade das reações químicas. Isso ocorre pois o aumento da temperatura da solução com a amostra, faz aumentar a energia cinéticas das moléculas. Esse fenômeno amplia a possibilidade de choque entre os reagentes bem como a energia do choque favorecendo assim a reação de dissolução do metal no licor da lixiviação (Atkins; Jones, 2012; Brown; Lemay; Bursten, 2005).

Em seguida, a pressão também é uma variável proeminente para os processos de hidrometalurgia. Apesar de grande parte dos processos hidrometalúrgicos serem realizados a pressão atmosférica, às vezes, para o aumento da extração do metal de interesse são necessários modificações na pressão, principalmente na fase de lixiviação. Como exemplo, o alumínio que é extraído da bauxita brasileira trabalha em reatores sobre pressão de 3 bar (Rodrigues, 2018).

Por fim, a agitação é utilizada conforme a matéria-prima e o elemento de interesse, sendo principalmente empregada nos tanques de lixiviação onde a alimentação é uma carga finamente moída. Em contrapartida, quando se obtém um material pouco moído as metodologias sem agitação, como percolação e em pilhas, são preferíveis para o processamento hidrometalúrgico. (Havlík, 2008; Souza, 2013).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 MATERIAL

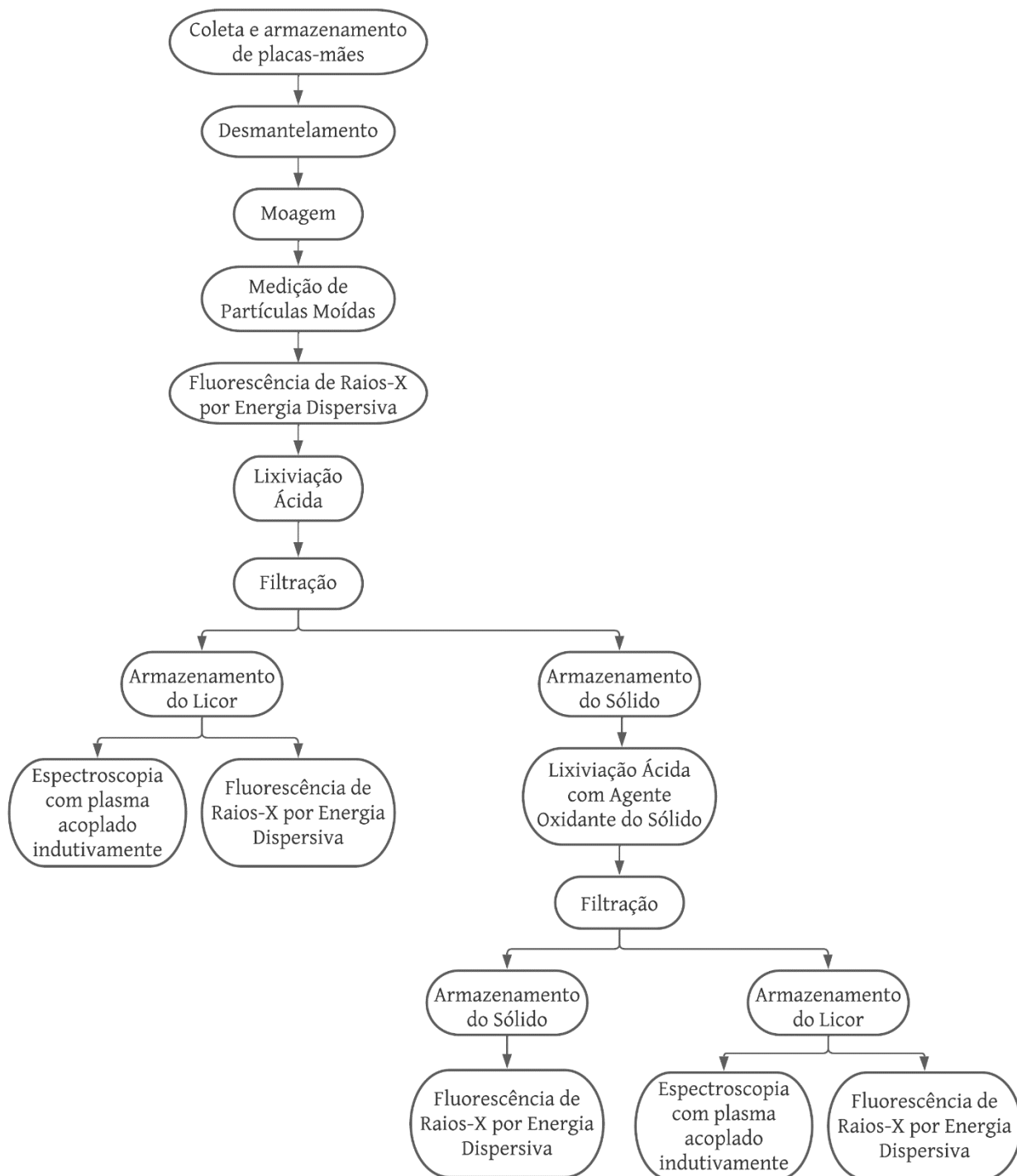
Os materiais que serão utilizados estão elencados a seguir:

- Alicate de corte;
- Alicate-tesoura;
- Ferro de solda;
- Sugador de solda;
- Chave de fenda;
- Morsa;
- Vidro-relógio;
- Balão de fundo chato redondo de 500 mL com duas bocas;
- Pisseta;
- Pipeta graduada;
- Pera;
- Bureta;
- Condensador de refluxo;
- Porta amostras;
- Placa de Petri;
- Cronômetro;
- Papel de filtro;
- Béquer;
- Dessecador;
- Balança analítica;
- Balança semi-analítica;
- Manta aquecedora;
- Filtro à vácuo.

#### 3.2 VISÃO GERAL DO PROCESSAMENTO

As placas de circuito impresso serão tratadas em triplicata conforme o fluxograma apresentado na Figura 6.

Figura 6 – Fluxograma do processamento das PCIs

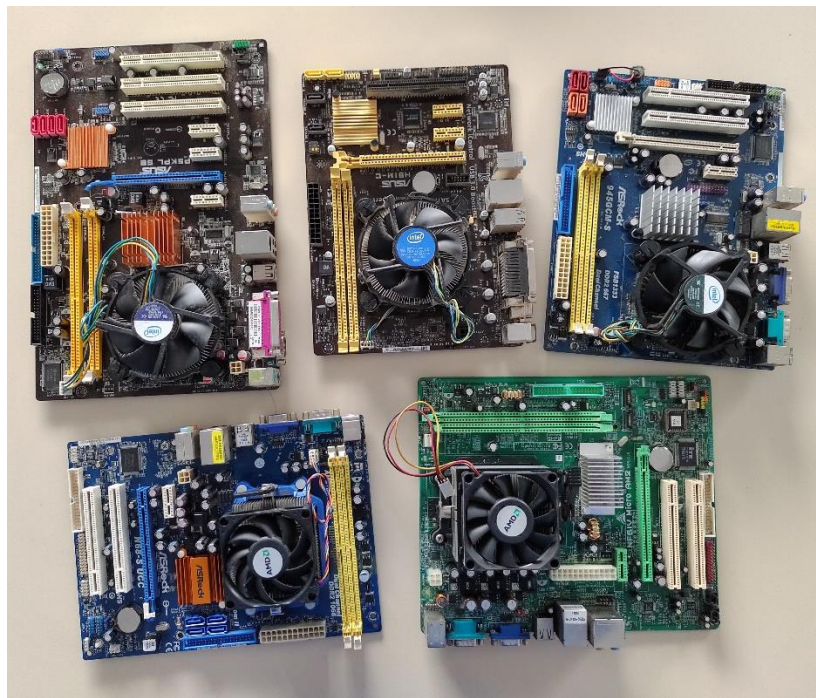


Fonte: Própria

### 3.3 COLETA E DESMANTELAMENTO

Foram coletadas cinco placas-mães de computadores do setor de informática da Escola Superior de Tecnologia (EST) na Universidade do Estado do Amazonas destacadas na Figura 7. Aferiu-se a massa do conjunto com auxílio de uma balança semi-analítica Shimadzu UW6200H ( $\pm 0,01$ ). Foram retirados os ventiladores e os trocadores de calor metálicos abaixo do ventilador das placas-mães. Mediu-se novamente a massa.

Figura 7 – Placas-mães coletadas no setor de informática da EST



Fonte: Própria

Após isso, os componentes foram sendo retirados das placas-mães com auxílio de alicates de corte, chaves de fenda, ferro de solda e sugador de solda. Eles foram distribuídos em quatro fluxos distintos: metais pequenos, plásticos, componentes eletrônicos e placas de circuito impresso. Ao final, pesou-se todos os fluxos na balança semi-analítica.

### 3.4 MOAGEM

As placas de circuito impresso foram cortadas com auxílio de alicates de corte, alicate-tesoura e uma morsa, em formatos retangulares ou quadrados. A priori, reduziu-se as PCIs

maiores para tamanhos aproximados de 3 cm x 3 cm com auxílio da morsa e do alicate-tesoura. Em seguida, utilizou-se os alicates de corte e alicate-tesoura para reduzir ao máximo o tamanho das peças.

### 3.5 MEDIÇÃO DE PARTÍCULAS MOÍDAS

Para encontrar os valores médios de altura, largura, área e massa, foi seguido o seguinte procedimento: foram retiradas 60 peças aleatórias das placas moídas e, com auxílio de um paquímetro Messen® Carbs 18738 ( $\pm 0,05$ ) e uma balança analítica Shimadzu AUY220 ( $\pm 0,0001$ ), foram medidas altura, largura e massa de cada peça. Com a largura e altura, calculou-se a área multiplicando ambas as medidas. Foi determinada a média da largura, altura, área e massa com seus respectivos desvios-padrão e amplitudes.

### 3.6 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA

Tendo como base o trabalho de Moraes (2011) e o artigo de revisão de Li, Eksteena e Orabv (2018) para escolha das concentrações e das temperaturas de trabalho, estabeleceu-se a concentração de 0,5 M de ácido sulfúrico para a lixiviação ácida e a temperatura de trabalho de 75°C. Fez-se duas lixiviações em triplicata com volumes finais de solução de 150 mL e 250 mL para avaliar a solubilidade dos componentes nos diferentes volumes.

Foram pesados cerca 20g de amostra de PCI moídas com auxílio de uma balança analítica Shimadzu AUY220 ( $\pm 0,0001$ ) e um vidro relógio. Em um balão de fundo redondo de 500 mL com duas bocas adicionou-se 100 mL de água destilada medidos com auxílio de uma proveta. Com uma pipeta graduada, adicionou-se de ácido sulfúrico 96% conforme a Tabela 1 e completou-se o volume com água destilada até o volume final de cada experimento. Foram adicionadas as placas de PCI moídas no balão.

Tabela 1 – Quantidade de reagentes utilizados na lixiviação ácida

Volume total (mL)	Quantidade de ácido sulfúrico utilizada (mL)
150	4,2
250	7

Fonte: Própria

O balão de fundo redondo com a solução e as placas foi posto em uma manta de aquecimento. Foram acoplados um condensador e um termômetro em cada uma das bocas da vidraria. A manta foi ligada e manteve-se a temperatura acima de 75°C por 4 horas. A montagem da estrutura pode ser visualizada na Figura 8.

Figura 8 – Montagem da lixiviação.



Fonte: Própria

Após as 4 horas, o aquecimento da manta foi desligado e deixou-se atingir a temperatura de 35°C. A solução e amostra foram depositadas em um filtro à vácuo. A porção sólida foi lavada com água destilada. Foi medido o volume do filtrado e, logo após, foi armazenado se tornando o licor da lixiviação sulfúrica (LLS). A porção sólida foi posta em uma placa de Petri previamente pesada dentro de um dessecador para secagem dando a polpa da lixiviação sulfúrica (PLS). Antes da lixiviação ácida com agente oxidante, as amostras foram pesadas em uma balança analítica para determinar a massa após a lixiviação ácida.

### 3.7 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA COM AGENTE OXIDANTE

Ainda tendo como base os trabalhos de Moraes (2011) e de Li, Eksteena e Orabv (2018), definiu-se as concentrações de ácido sulfúrico em 1,5 M e de peróxido de hidrogênio em 1,6 M, assim como a temperatura em 75°C. Seguindo a divisão com os mesmos volumes de 150 mL e 250 mL de solução final.

Em um balão de fundo redondo de 500 mL com duas bocas adicionou-se 100 mL de água destilada medidos com auxílio de uma proveta. Com duas pipetas graduadas, adicionou-se ácido sulfúrico 96% e peróxido de hidrogênio 50% conforme determinado pela Tabela 2, completou-se o volume com água destilada até seu volume final. Foram adicionadas as peças da polpa da lixiviação sulfúrica (PLS) advindas da lixiviação ácida.

Tabela 2 – Quantidade de reagentes utilizados na lixiviação ácida com agente oxidante

Volume total (mL)	Quantidade de ácido sulfúrico utilizada (mL)	Quantidade de peróxido de hidrogênio adicionado (mL)
150	12,6	14
250	20,9	23,3

Fonte: Própria

O balão de fundo redondo com a solução e a PLS foi posto em uma manta de aquecimento. Foram acoplados um condensador e um termômetro em cada uma das bocas da vidraria. A manta foi ligada e manteve-se a temperatura acima de 75°C por 2 horas. O experimento foi feito em triplicata.

Após 2 horas, o aquecimento da manta foi desligado e deixou-se atingir a temperatura de 35°C. A solução e amostra foram depositadas em um filtro à vácuo. A porção sólida foi lavada com água destilada. Foi medido o volume do filtrado e, logo após, foi armazenado se tornando o licor da lixiviação sulfúrica com agente oxidante (LSP). A porção sólida foi posta em uma placa de Petri previamente pesada dentro de um dessecador para secagem dando origem a polpa da lixiviação sulfúrica com agente oxidante (PLP). Após a secagem, a massa foi aferida novamente.

### 3.8 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA POR PLASMA ACOPLADO

As análises de espectrometria de emissão ótica por plasma acoplado (ICP-OES) foram feitas para qualificar e quantificar os elementos químicos presentes nas amostras do licor da lixiviação sulfúrica e do licor da lixiviação sulfúrica com agente oxidante. O preparo das amostras para análise foi realizado da seguinte forma: mediu-se 1 mL de amostra com auxílio de uma pipeta automática da marca KASVIbasic modelo K1-1000F (G1000) ( $\pm 0,0001$ ), esse volume foi transferido para um balão volumétrico de 500 mL e completou-se com água destilada.

As amostras diluídas foram encaminhadas para o equipamento ICP-OES 9800, da marca SHIMADZU, instalado na Central de Análises Químicas da Escola Superior de Tecnologia. As condições de operação do equipamento para a análise de metais estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3 – Condições de operação do ICP-OES

Parâmetros	Condições
Potência de radiofrequência	1,20 kW
Gás do Plasma	10,00 L/min
Gás Auxiliar	0,60 L/min
Gás de Arraste	0,70 L/min
Tempo de exposição	30 segundos
Direção da vista	Axial

Fonte: Própria

### 3.9 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X POR ENERGIA DISPERSIVA

As análises de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (EDXRF) foram realizadas para qualificar e quantificar os elementos químicos presentes nas amostras do licor e da polpa de ambas as lixiviações. As amostras foram encaminhadas para o equipamento modelo FisherScope\* X Ray XAN 252, tubo de tungstênio, tempo de exposição de 200 s, com voltagem entre 0 e 40 KeV, instalado no Laboratório de Síntese e Caracterização de Nanomateriais do Instituto Federal do Amazonas. Todos os elementos foram identificados por suas energias  $K\alpha$  e/ou  $K\beta$  (Janssens, 2003).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 MOAGEM E MEDIÇÃO

As placas-mães recebidas do setor de informática obtiveram uma massa de 3737,36 g, retirou-se os ventiladores e os trocadores de calor delas por serem fáceis de remover e a massa obtida do conjunto foi de 2511,35 g.

Após o desmantelamento das placas e sua pesagem, foram obtidos os seguintes valores delimitados na Tabela 4 e ilustrados pelas Figuras 9, 10, 11 e 12.

Tabela 4 – Massa dos componentes das placas-mães

Componente	Massa (g)	Porcentagem (%)
Metais pequenos	649,43 g	26,07
Plásticos	321,18 g	12,89
Componentes eletrônicos	530,96 g	21,32
PCIs	989,36 g	39,72
Total	2490,93 g	100

Fonte: Própria

Nota-se que a massa total das placas antes do desmantelamento e depois da separação difere em 20,42 g. Isso ocorre pelas perdas de componentes durante o processo de desmontagem e corte que não puderam ser recuperados. Outro ponto a ser analisado é a proporção dos componentes em relação à massa total, listando do maior para o menor em termos de massa tem-se: PCIs, metais pequenos, plásticos e componentes eletrônicos.

As PCIs que representam cerca de 40% em massa das placas-mães podem ser encaminhadas para processos complexos de recuperação devido a sua natureza. Os metais pequenos podem ser encaminhados diretamente para reciclagem de metais, uma vez que são compostos de ligas específicas de fácil recuperação. Os componentes plásticos também podem ser encaminhados para uma central específica de recuperação uma vez que sua manipulação também é simples.

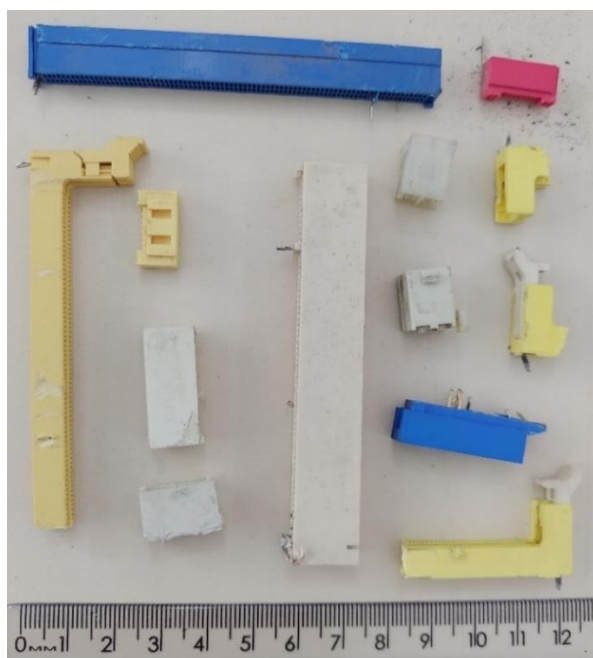
Por fim, os componentes eletrônicos, como baterias, resistores, capacitores, necessitam de um descarte mais apropriado, tendo em vista que além de serem diversos, podem conter elementos tóxicos como mercúrio e cádmio (Kumar; Holuszko; Song, 2022).

Figura 9 – Metais pequenos



Fonte: Própria

Figura 10 – Plásticos



Fonte: Própria



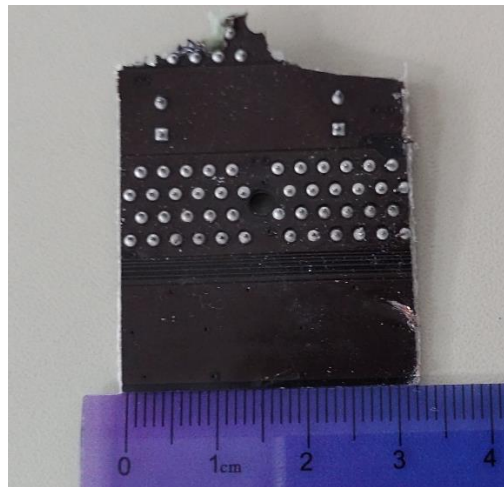
A primeira redução do tamanho das placas foi realizada com o alicate-tesoura com apoio de uma morsa para fixar as placas. Esse sistema possui um poder de corte maior do que os alicates de corte, uma vez que os mesmos não tinham força suficiente para quebrar as placas. Conseguiu-se reduzir para tamanhos aproximados de 3 cm x 3 cm como ilustrado pelas Figuras 13 e 14.

Figura 13 – Formato das placas cortadas



Fonte: Própria

Figura 14 – Placa única cortada



Fonte: Própria

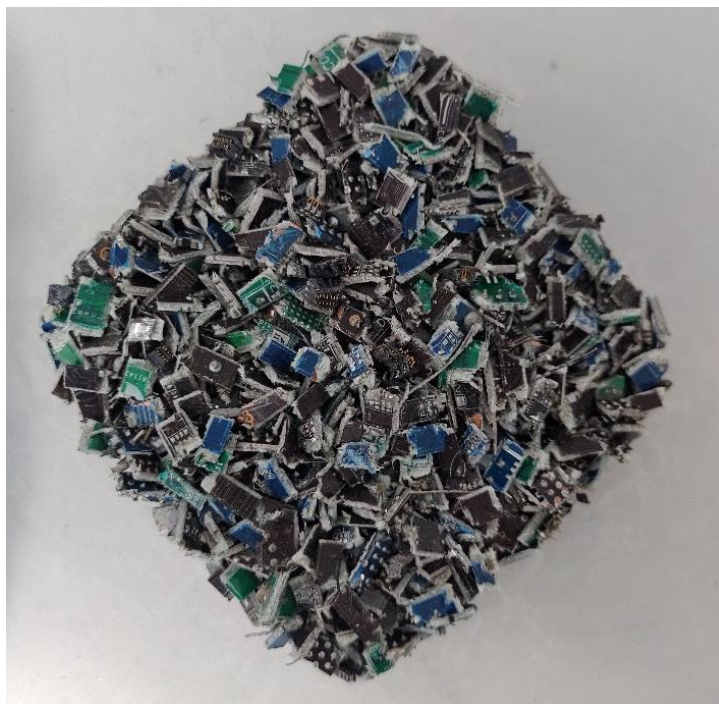
A segunda redução de tamanho foi realizada com o alicate-tesoura e os alicates de corte. Pegou-se as placas de 3 cm x 3 cm e com o alicate-tesoura fez-se tiras, exemplificado pela Figura 15. Em seguida, com dois alicates de cortes fizeram-se movimentos de torção para que as placas quebrassem no menor tamanho possível, reduzindo-se ao tamanho demonstrado na Figura 16.

Figura 15 – Placas cortadas em tiras



Fonte: Própria

Figura 16 – Placas reduzidas ao tamanho mínimo



Fonte: Própria

O uso de trituradores, também chamados de moinhos, é uma ótima opção para a segunda parte da trituração das PCIs quando se deseja reduzir ao máximo o tamanho das placas ou até

mesmo pulverizá-las. Na literatura, é possível encontrar o uso de moinho de facas e martelos para esse trabalho. Vale ressaltar que não é possível utilizar qualquer tipo de moinho para a fragmentação, pois as placas são muito resistentes ao processo de fragmentação (Caldas *et al.*, 2019; Gerbase; Oliveira, 2012; Moraes, 2011).

Durante o transcórrer deste trabalho, não foi possível utilizar os moinhos adequados para a trituração das PCIs. Dessa forma, foi empregado o trabalho físico para a redução das placas ao menor tamanho possível. Além do desgaste físico dessa atividade, isso também afeta a homogeneidade do tamanho das peças resultantes após a trituração manual. Como o tamanho de partícula é um fator relevante para a lixiviação, ele pode prejudicar a extração do metal de interesse.

Após a moagem, foram feitas as medições propostas utilizando toda a massa de PCIs que foi triturada. Foram determinadas as médias e as amplitudes de cada valor como demonstradas na Tabela 5, sendo que os valores completos podem ser vistos no Apêndice A.

Tabela 5 – Medidas médias das PCIs moídas

Variáveis	Média	Desvio-padrão	Amplitude
Altura (cm)	0,326	0,153	0,600
Largura (cm)	0,728	0,219	1,135
Área (cm <sup>2</sup> )	0,242	0,142	0,581
Massa (g)	0,1806	0,0667	0,2569

Fonte: Própria

Analisando os valores obtidos, é possível observar que as amostras não são homogêneas. Quando se compara as estimativas médias com os desvios-padrão, vê-se que o segundo está muito elevado indicando que o conjunto amostral tem uma ampla variabilidade ao redor da média. Isso pode ser corroborado fazendo uma análise da amplitude das medidas.

Conceitualmente, a amplitude é a diferença entre o maior e menor valor do grupo amostral. Ao ser aplicado nesses dados, encontra-se uma amplitude extremamente alta para todos os fatores analisados. Isso se dá pelo fato de que o trabalho de moagem foi realizado de forma manual sem um equipamento próprio para trituração e classificação.

## 4.2. LIXIVIAÇÃO ÁCIDA

Devido ao tamanho das peças de PCIs, não foi possível aferir exatamente 20 g de amostra para cada experimento. Dessa forma, tentou-se chegar o mais próximo possível desse valor. Na

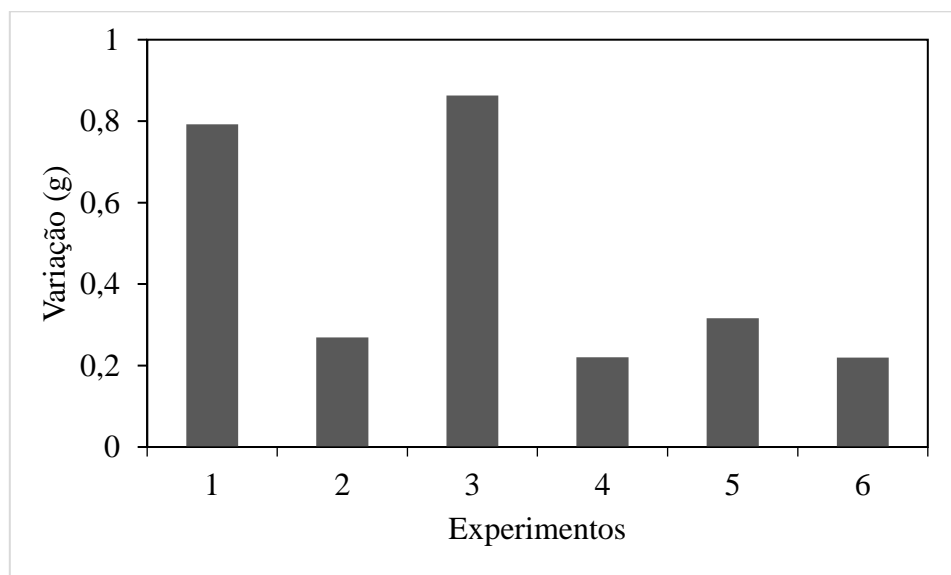
Tabela 6, é possível verificar as massas iniciais de cada experimento e, também, após a lixiviação ácida que é a massa da PLS. Na Figura 17, observa-se a representação gráfica da variação das massas na lixiviação ácida. Utilizou-se a nomenclatura 1, 2, 3 para identificar a triplicata com volume final de 150 mL e 4, 5, 6 para o volume final de 250 mL.

Tabela 6 – Massa dos experimentos na lixiviação ácida

Experimento	Massa inicial (g)	Massa PLS (g)	Varição (g)
1	20,0441	19,2521	0,7920
2	20,0138	19,7449	0,2689
3	20,0109	19,1481	0,8628
4	20,0098	19,7898	0,2200
5	20,0219	19,7054	0,3165
6	20,0349	19,8150	0,2199

Fonte: Própria

Figura 17 – Variação de massa em g para a lixiviação ácida



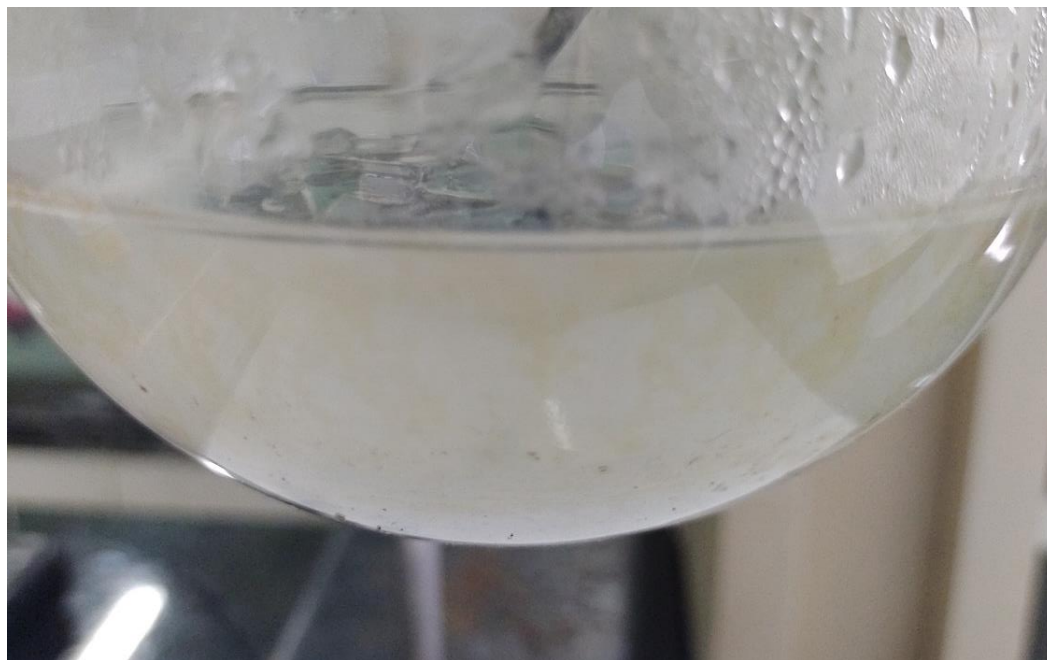
Fonte: Própria

Dentro dos seis experimentos, percebe-se que houve uma disparidade entre a variação de massa entre eles. Isso pode ter sido causado pela diferença de estabilidade das mantas de aquecimento utilizadas e também pelo volume de líquido dentro dos balões volumétricos. Nos experimentos com volumes de 150 mL, percebe-se uma maior variação do que aqueles de volume de 250 mL.

A manta utilizada no experimento 2 foi a que manteve a temperatura mais estável entre os experimentos 1, 2, 3. Já nos experimentos 4, 5, 6, o controle de temperatura foi mais eficiente uma vez que havia um maior volume de líquido para aquecimento. As variações de temperaturas das mantas podem ter ocasionado uma maior agitação das PCIs dentro do balão devido a formação de bolhas e dessa forma uma maior dissolução dos componentes na fase líquida.

Além disso, o licor formado pela lixiviação ácida possui uma cor esbranquiçada, conforme demonstrado na Figura 18, que pode ser ocasionada pela remoção dos metais como o alumínio, cálcio e estanho. Esses metais em conjunto com os sulfatos formam substâncias que possuem a coloração branca como o sulfato de alumínio, sulfato de cálcio e o sulfato estanoso (National Center for Biotechnology Information, 2023a; 2023b; 2023c).

Figura 18 – Licor esbranquiçado da lixiviação ácida



Fonte: Própria

#### 4.3 LIXIVIAÇÃO ÁCIDA COM AGENTE OXIDANTE

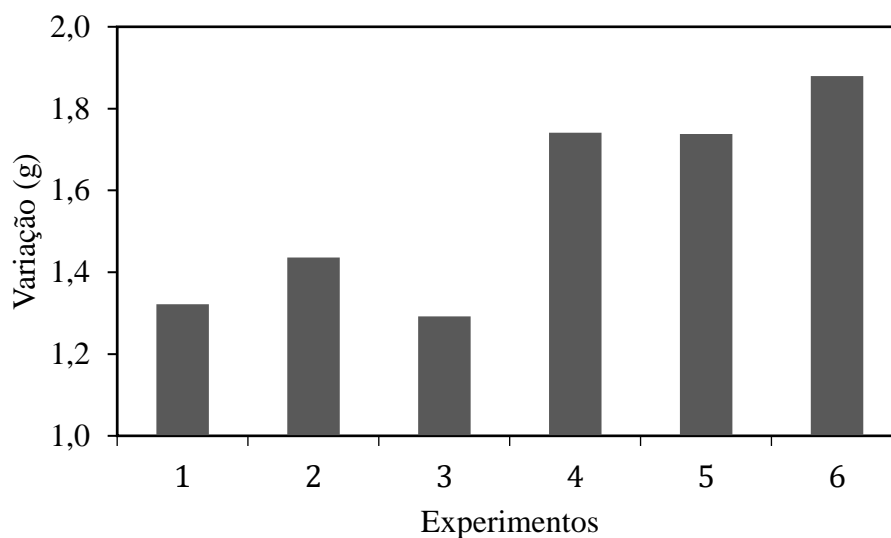
Após o processo de lixiviação com agente oxidante, foi possível identificar a massa da PLP em comparação com a massa da PLS que estão dispostas na Tabela 7. A variação das massas é ilustrada na Figura 19. Utilizou-se a nomenclatura 1, 2, 3 para identificar a triplicata com volume final de 150 mL e 4, 5, 6 para o volume final de 250 mL.

Tabela 7 - Massa dos experimentos na lixiviação ácida com agente oxidante

Experimento	Massa PLS (g)	Massa PLP (g)	Varição (g)
1	19,2521	17,9300	1,3221
2	19,7449	18,3088	1,4361
3	19,1481	17,8561	1,2920
4	19,7898	18,0486	1,7412
5	19,7054	17,9671	1,7383
6	19,8150	17,9356	1,8794

Fonte: Própria

Figura 19 – Variação da massa em g para a lixiviação ácida com agente oxidante



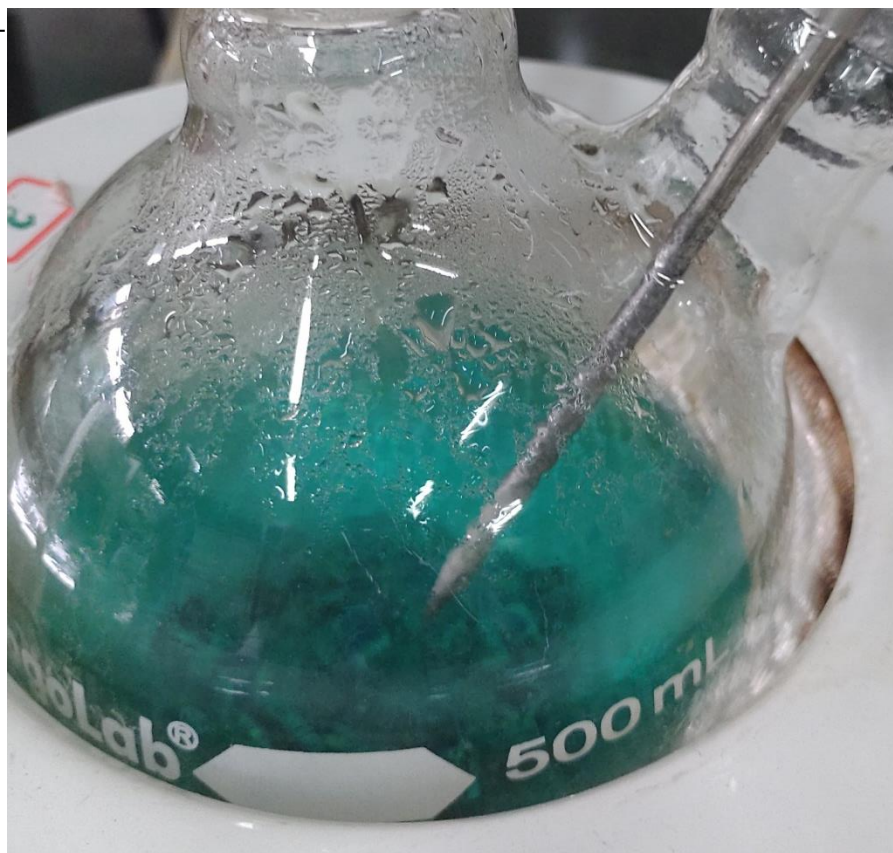
Fonte: Própria

É possível observar que nos seis experimentos a dissolução da massa da PLS foi maior que na etapa da lixiviação ácida. Esse fato é ocasionado pela presença do peróxido de hidrogênio que funciona, nesse caso, como um impulsionador da reação química para a solubilização dos componentes das PCIs.

Outro fator a ser analisado é que a variação de massa removida nos seis experimentos onde, tanto nos experimentos com volume final de 150 mL quanto nos de 250 mL, foram encontrados valores semelhantes dentro de suas triplicatas. Para os de 150 mL, obteve-se uma média de 1,3501g de solubilização, já para os de 250 mL, obteve-se 1,7863 g. Comparando as médias, nota-se que um maior volume de solução possibilitou uma maior dissolução dos componentes da placa.

Outrossim, o licor da lixiviação ácida com agente oxidante apresentou a coloração azul-esverdeada exposto na Figura 20. Essa coloração pode ser derivada da combinação de dois metais com os ânions de sulfato, sendo eles: o cobre e o níquel. O sulfato cúprico pode variar entre as cores azul intenso quando está acompanhado de cinco moléculas de água até um branco-esverdeado quando desidratado, já o sulfato níqueloso possui uma coloração verde (National Center for Biotechnology Information, 2023d; 2023e; 2023f).

Figura 20 - Licor azul turquesa da lixiviação ácida com agente oxidante.



Fonte: Própria

#### 4.4 ESPECTROMETRIA DE EMISSÃO ÓTICA POR PLASMA ACOPLADO

Os resultados do ICP-OES seguem dispostos nas Tabelas 8 e 9. A Tabela 8 apresenta os resultados do licor da lixiviação ácida, enquanto a Tabela 9 apresenta os resultados do licor da lixiviação ácida com agente oxidante. Utilizando novamente a nomenclatura de 1, 2, 3 para identificar a triplicata com volume final de 150 mL e 4, 5, 6 para o volume final de 250 mL.

Tabela 8 - Concentração dos elementos em g/L no LLS

Elementos	LLS1	LLS2	LLS3	LLS4	LLS5	LLS6
Al	0,129	0,118	0,119	0,177	0,180	0,152
B	0,061	0,041	0,047	0,050	0,043	0,030
Ca	0,425	0,385	0,385	0,447	0,440	0,474
Cu	0,002	N.D.	N.D.	0,017	0,010	0,019
Fe	0,062	0,045	0,039	N.D.	N.D.	N.D.
Gd	N.D.	N.D.	N.D.	0,015	0,015	0,016
K	0,043	0,039	0,038	N.D.	N.D.	N.D.
Li	0,024	0,024	0,023	N.D.	N.D.	N.D.
Rb	0,037	0,035	0,017	N.D.	N.D.	N.D.
Si	0,069	0,060	0,058	0,043	0,040	0,024
Sn	0,007	0,005	0,009	N.D.	N.D.	N.D.
Ti	0,0002	N.D.	N.D.	N.D.	0,003	N.D.

Fonte: Própria

Dentre os elementos presente nos licores, o alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe), estanho (Sn), titânio (Ti) e gadolínio (Gd) são metais que estão presente nas ligas metálicas. Boro (B), cálcio (Ca) e sílica (Si) são componentes da fibra de vidro utilizada na estrutura da PCI. Por fim, potássio (K), lítio (Li) e rubídio (Rb) são elementos utilizados na confecção de baterias (Atkins; Jones, 2012; Berndt; Spahrbier, 2014; Gerbase; Oliveira, 2012; Kemerich *et al.*, 2013; National Center for Biotechnology Information, 2023g; Smart; Moore, 2012).

A presença de K, Li e Rb é esperada, pois são elementos do grupo dos metais alcalinos que por via de regra são solúveis em qualquer pH. Os elementos Al, Ca, Fe, Ti e Gd também eram esperados uma vez que são solúveis na zona de pH ácido que neste trabalho foi ocasionada pela adição de ácido sulfúrico (Atkins; Jones, 2012; Brookins, 1988).

Os elementos B, Sn, Cu e Si, a priori, não seriam dissolvidos pela solução de ácido sulfúrico. Entretanto, os resultados apresentaram esses elementos. Segundo Brookins (1988), o boro em soluções ácidas apresenta a forma de  $H_3BO_3$ , ou seja, o ácido bórico. Esse ácido apresenta solubilidade de até 50 g/L, dessa forma, após a extração pelo solvente, a quantidade de boro apresentada é compatível e está bem abaixo do que a literatura dispõe (National Center for Biotechnology Information, 2023h).

Para House e Kelsall (1984), o estanho se apresenta em formato sólido em quase todo o espectro de pH nas formas de  $SnO_2$  ou  $Sn(OH)_4$ . Entretanto, para soluções ácidas com pH perto de

O, o estanho pode se dissociar no íon  $\text{Sn}^{+4}$  e isso explica a presença desse elemento nos licores analisados.

A presença de cobre nas amostras do licor, apesar de não serem esperadas, já foi relatada em trabalhos de Li, Eksteena e Orabv (2018) e Moraes (2011). Esses estudos mostram que após períodos de lixiviação iguais ou superiores a 4 horas com ácido sulfúrico, o cobre pode ser solubilizado em pequenas quantidades.

Por fim, conforme Gomes, Furtado e Souza (2018), a sílica amorfa apresenta uma solubilidade de até 0,115 g/L que pode ser aumentada com a elevação da temperatura. Dessa forma, os valores encontrados estão de acordo com o estabelecido com a literatura.

Quando se compara os resultados para os diferentes volumes finais de solução, é possível observar que os elementos Al, Cu, Ca apresentaram uma maior solubilidade com o aumento do volume da solução, enquanto Si e B tiveram uma leve redução na sua solubilização. O fato de que houve uma redução na extração de Si e B pode ser devido a melhor estabilidade da temperatura do sistema no volume de 250 mL.

A presença de Ti em somente dois experimentos pode ser explicada por sua pequena porcentagem nas ligas metálicas aplicadas nas PCI onde ao se fazer a extração com um agente lixiviante a quantidade removida de Ti é muito pequena para a detecção pelo equipamento utilizado.

Em relação aos elementos Fe, K, Rb, Sn e Li, é possível notar a presença dos mesmos nos experimentos de 150 mL, mas estão ausentes nos experimentos com 250 mL. A razão para essa ausência pode ser acarretada pelo aumento do volume da solução final, ou seja, a quantidade extraída de metal nos experimentos é a mesma, porém como o volume final da solução é maior os elementos apresentam uma concentração menor com o aumento desse volume.

Dessa forma, quando se dilui as amostras para que sejam analisadas, as concentrações dos metais extraídos caem abaixo do poder de análise do equipamento utilizado fazendo com que esses elementos não sejam detectados pelo método.

Por fim, o gadolínio foi detectado somente na lixiviação com 250 mL. Existe a possibilidade de que a solução com 150 mL estivesse saturada com a quantidade de metais já solubilizados pela solução, dessa forma não foi possível que o elemento se solubilizasse até o nível de ser detectado pelo equipamento.

Tabela 9 - Concentração dos elementos em g/L no LSP

Elementos	LSP1	LSP2	LSP3	LSP4	LSP5	LSP6
Al	0,127	0,127	0,155	0,179	0,188	0,135
B	0,038	0,038	0,047	0,047	0,047	0,028
Ca	0,568	0,258	0,303	0,263	0,281	0,210
Cu	4,275	4,575	4,025	5,650	5,450	5,350
Fe	0,190	0,390	0,340	0,233	0,353	0,269
Gd	N.D.	N.D.	N.D.	0,016	0,015	0,016
K	0,046	0,041	0,040	N.D.	N.D.	N.D.
Li	0,027	0,025	0,024	N.D.	N.D.	N.D.
Ni	0,050	0,066	0,038	N.D.	N.D.	N.D.
Rb	0,080	0,064	0,054	N.D.	N.D.	N.D.
Si	0,055	0,071	0,078	0,032	0,033	0,016
Sn	N.D.	N.D.	0,203	N.D.	N.D.	N.D.
Ti	N.D.	N.D.	0,002	N.D.	0,003	0,003
Zn	0,220	0,455	0,233	0,210	0,219	0,341

Fonte: Própria

Analisando a Tabela 9, é possível identificar que todos os elementos apresentados na Tabela 8 também se encontram nestes licores com a adição dos elementos níquel (Ni) e zinco (Zn). Ambos estão presente na liga metálica que compõem a placa (Gerbase; Oliveira, 2012).

Em teoria, Ni e Zn se solubilizariam na lixiviação ácida como exemplificado nos trabalhos de Jadhav e Hocheng (2015) e Moraes (2011). Entretanto, sua solubilização só ocorreu na lixiviação ácida com agente oxidante. Isso pode ter acontecido devido o cobre atuar como metal protetor, ou seja, o ácido sulfúrico não conseguiu acesso aos elementos devido a eles estarem mesclados com o cobre na liga metálica usada para a fabricação dos circuitos. Outra hipótese para o Ni é que ele pode não ter sido identificado pelo equipamento devido a sua baixa concentração no licor analisado.

Além disso, o fato de que as amostras não foram trituradas em um moinho apropriado afeta a área de contato da solução com as partes metálicas da PCI fazendo com que seja reduzida a eficiência da solubilização desses metais. Dessa forma, ressalta-se que a adição de um moedor para a trituração das PCIs é indispensável para seu processamento por meios hidrometalúrgico.

Quando se compara os experimentos de 150 mL e 250 mL, é possível observar que para os elementos Al e Cu houve um aumento da concentração com o aumento do volume da solução. Já para B, Ca e Si, foi observada uma redução na dissolução desses elementos com o aumento da solução.

Para B e Si, a redução pode ser causada pela melhor estabilidade da temperatura da solução com maior volume. Enquanto para o Ca, essa redução pode ser explicada por uma melhor extração de Ca na lixiviação ácida quando se aumenta o volume da solução ocasionando assim uma menor concentração de Ca na placa para ser extraída ao se fazer a lixiviação ácida com agente oxidante.

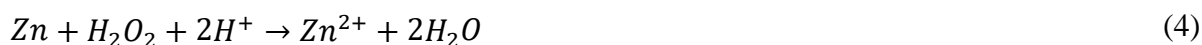
Os elementos Fe e Zn apresentam variações que não seguem um padrão o que pode ser um indicativo de que para esses elementos o volume da solução não é significativo. Para os elementos K, Li, Ni e Rb, pode-se aplicar a mesma explicação da lixiviação ácida onde o aumento do volume diminui a concentração no licor e, conseqüentemente, os elementos ficam fora do limite de detecção do equipamento.

A presença de Ti em somente três experimentos pode ser explicada novamente por sua pequena porcentagem nas ligas metálicas aplicadas nas PCI. Sendo assim, ao se fazer a extração com um agente lixiviante a quantidade removida de Ti é muito pequena para a detecção pelo equipamento utilizado. Em relação ao Sn, encontrou-se uma quantidade elevada dele no experimento 3 que pode ter sido acarretada por alguma interferência ou contaminação durante as lixiviações e o processo de análise.

Nesta etapa de lixiviação, o gadolínio também foi detectado somente na lixiviação com 250 mL. Novamente, ressalta-se que a solução com 150 mL pode estar saturada com os íons já dissolvidos e que só foi possível a dissolução de Gd quando se aumentou o volume da solução.

Quando se compara as duas lixiviações, a ácida e a ácida com agente oxidante, é possível observar que para os elementos Al, B, Ca, Gd, K, Li, Rb, Si, Sn e Ti não houve diferenças exorbitantes nas concentrações desses elementos nos licores. Já para os elementos Cu, Fe, Ni e Zn, a adição do peróxido de hidrogênio favoreceu o processo de extração desses elementos. Em destaque, o cobre deixou de ter uma dissolução quase nula para concentrações médias de 4,292 g/L para o volume final de 150 mL e 5,483 g/L para o volume final de 250 mL.

As reações químicas que podem ter ocorridas com a adição do peróxido de hidrogênio para impulsionar a extração dos elementos Cu, Fe, Ni e Zn são descritas por C. Silva *et al.* (2020):



Além disso, a proeminência da extração do cobre com adição de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> é relatada por diversos autores, entre eles Correa *et al.* (2018), C. Silva *et al.* (2020) e Moraes (2011). Dessa forma, a extração do cobre apresentada neste trabalho segue de acordo com literatura.

#### 4.5 FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X POR ENERGIA DISPERSIVA

Os resultados do EDXRF seguem dispostos nas Tabelas 10, 11 e 12. A Tabela 10 apresenta a composição das PCIs antes do processo de lixiviação e das polpas após as duas lixiviações realizadas. A Tabela 11 mostra os resultados obtidos para os licores da lixiviação ácida, já a Tabela 12 apresenta os resultados para os licores da lixiviação ácida com agente oxidante. Utilizando a nomenclatura de 1, 2, 3 para identificar a triplicata com volume final de 150 mL e 4, 5, 6 para o volume final de 250 mL.

Tabela 10 – Composição elementar da PCI *in natura* e das PLP em % em massa

Amostras	Placa <i>in natura</i>	PLP1	PLP2	PLP3	PLP4	PLP5	PLP6
Ag	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0896
Al	33,4822	21,9959	28,7535	24,6571	26,7269	31,8169	15,4371
As	N.D.	N.D.	0,0020	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Ba	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	2,2135
Br	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	6,8501
Ca	0,6306	2,2188	0,8947	1,3353	1,8865	1,1210	1,9303
Cl	0,3448	0,3905	0,3224	0,2974	0,4764	0,3290	0,3638
Cr	0,0284	0,0347	0,0443	0,0283	0,0535	0,0424	0,0335
Cu	4,5690	20,0690	11,3491	17,1593	16,6476	9,8940	24,8853
Fe	0,0107	N.D.	0,0100	N.D.	N.D.	0,0139	0,0100
Hg	0,0925	0,1848	0,1669	0,1561	0,2393	0,1619	0,1370
Ni	0,0485	0,0169	0,0088	0,0070	0,0130	0,0116	0,0124
Pb	0,0112	0,0185	0,0125	0,0147	0,0258	0,0183	0,0128
Rb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0052
Si	12,6112	12,5789	11,8215	12,5502	9,6555	10,1492	8,6913
Sn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	3,2450
Sr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0839
Ti	1,5255	1,5383	2,5570	1,5857	2,6608	2,1271	2,6673
Tl	0,0194	0,0347	0,0306	0,0226	0,0438	0,0302	0,0245

Fonte: Própria

Os elementos presentes nas porções sólidas das placas podem ser divididos em duas categorias: a porção advinda da parte metálica da PCI e da porção não metálica da PCI. Os

elementos: prata (Ag), alumínio (Al), arsênio (As), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), mercúrio (Hg), níquel (Ni), chumbo (Pb), rubídio (Rb), estanho (Sn), Titânio (Ti) e Tálho (Tl) estão presente nas diversas ligas metálicas empregadas na construção das placas, ou seja, na porção metálica (Gerbase; Oliveira, 2012; Kumar; Holuszko; Janke, 2021; Li; Eksteena; Orabv, 2018; Munchen; Dias; Veit, 2022; Smart; Moore, 2012; Willner *et al.*, 2021).

Na porção não metálica são encontrados os outros elementos apresentados na Tabela 10, sendo que os elementos cálcio (Ca), sílica (Si) e estrôncio (Sr) estão presente na fibra de vidro que compõe a estrutura da placa, o bromo (Br) é utilizado como retardador de chama em diversos equipamentos eletrônicos, o bário (Ba) é um componente utilizado nos semicondutores da PCI e, por fim, o cloro (Cl) é um dos componentes do PVC que é o principal plástico utilizado nas PCIs (Buscaglia; Randall, 2020; Gerbase; Oliveira, 2012; Kemerich *et al.*, 2013; Li; Eksteena; Orabv, 2018; Pieroni; Leonel; Fillmann, 2017).

Comparando a composição da placa *in natura* com as placas após os processos lixiviatórios, é possível observar que os elementos Ca, Cr, Cu, Hg, Pb, Ti e Tl aumentaram sua porcentagem na composição do material. Em teoria, esperava-se que o teor desses elementos reduzisse após as lixiviações uma vez que o processo iria extrair os metais presente na PCI.

Essa discrepância pode ser explicada em virtude de que a moagem realizada não foi adequada, sendo assim a placa *in natura* não estava pulverizada o suficiente para que fosse possível realizar a análise de forma mais precisa. Dessa forma, ao serem lixiviadas as PCIs aumentaram a exposição dos metais presente em sua composição por causa dos ataques ácidos resultando em um teor superior após as duas etapas de lixiviação.

A Figura 21 mostra as placas pós-processamento onde é possível notar que as partes metálicas estão mais expostas que nas placas *in natura* demonstradas nas Figuras 15 e 16 durante o processo de moagem.

Figura 21 – Placas pós-processamento



Fonte: Própria

Em relação aos elementos e suas variações dentro da parte sólida do processo, tem-se que para os elementos Al e Ni, houve uma redução do teor que é compatível com o processo de extração. Para o Cl, o teor do mesmo não apresentou alterações bruscas quando se compara a placa *in natura* com as placas pós-processamento. O Si, obteve comportamentos diferente em relação ao volume final da solução. Para o volume final de 250 mL, o teor de Si reduziu nas PCIs, já para o volume final de 150 mL, o teor não reduziu.

O comportamento apresentado pela sílica pode ter relação com o limite de solubilidade que ela apresenta, ou seja, o volume de 150 mL não foi capaz de solubilizar a sílica pois se encontrava já no limite de saturação enquanto que o volume de 250 mL permitiu que a sílica se solubilizasse reduzindo assim seu teor nas PCIs.

Tabela 11 - Composição do licor da lixiviação ácida em % em volume

Amostras	LLS1	LLS2	LLS3	LLS4	LLS5
Ag	0,0030	0,0025	0,0001	0,0005	0,0001
Al	15,7156	17,9530	13,2243	24,6604	19,5777
As	3,5719	3,4537	2,8593	4,1780	2,9340
Ca	0,7764	0,0049	0,3119	0,9213	1,5298
Cd	6,3679	4,6357	5,3091	3,0050	4,4820
Cl	0,0432	0,0055	0,0089	0,8604	0,9740
Cr	0,3195	0,3096	2,5227	1,1400	0,3143
Cu	11,6339	6,0509	6,0982	8,0009	11,6840
Fe	0,2318	4,3188	3,2012	1,7104	3,3666
Hg	2,6047	4,2000	4,5996	2,0989	1,7249
Ni	1,8383	3,8909	2,3416	2,7418	4,8896
Pb	9,4952	7,9221	6,2062	6,2979	4,9298
Si	5,3590	6,6637	13,1113	0,9230	0,8562
Ti	3,0261	0,0156	0,0063	0,0291	1,7026
Tl	4,3538	3,2031	4,6959	3,9429	4,1173

Fonte: Própria

Analisando a Tabela 11 que apresenta os teores dos elementos nos licores das lixiviações ácidas, vê-se que a mesma apresenta alguns elementos que não estão presente nas análises realizadas pelo ICP-OES. Além disso, não foi possível realizar a análise do licor 6 do experimento com volume final de 250 mL.

Dentre os elementos comuns a ambas as análises, Al, Ca, Cu e Si apresentam comportamento iguais ao apresentado nas análises de ICP-OES. O Ti apresentou comportamento contrário ao presente no ICP-OES, ou seja, o aumento do volume provoca o aumento da concentração quando analisado pelo ICP-OES, o oposto ocorre no EDXRF onde ele diminui. Para o Fe, não é possível comparar pois o elemento não foi identificado pelo ICP-OES na lixiviação ácida com 250 mL.

Os novos elementos apresentados são Ag, As, Cd, Cl, Cr, Ni, Hg, Pb e Tl. Segundo Brookins (1988), os elementos Cd, Cl, Cr, Pb e Tl se decompõem em formas iônicas quando expostos a ambientes ácidos o que é o caso do experimento realizado. Nos trabalhos de Espinosa,

Oliveira e Martins (2022) e de Jadhav e Hocheng (2015), foi possível encontrar Ag nos licores utilizando as mesmas substâncias lixiviantes desse trabalho.

Segundo a literatura, As e Hg são insolúveis em água dessa forma não estariam presente nos licores. Uma explicação para isso é que durante o processo de lixiviação, esses metais tenham reagido com outros elementos presente nas PCIs e formado sais que são solúveis em água podendo dessa forma serem transferidos para o licor (National Center for Biotechnology Information, 2023i; 2023j).

Quando se compara a solubilização desses novos elementos analisados nos diferentes volumes finais, é possível observar que para Ag, Cd, Hg e Pb, o aumento do volume diminui o teor desses elementos na solução. Isso pode ser explicado pela concentração ser diminuída com a adição de água para o volume maior. Para o Cl, houve um aumento do teor do licor com o aumento do volume o que pode indicar uma extração maior.

Por fim, para os elementos As, Cr, Ni e Tl não houve diferenças perceptíveis nos teores o que pode indicar que para esses elementos é indiferente o volume final da solução na capacidade de extração desses elementos das PCIs.

Tabela 12 - Composição do licor da lixiviação ácida oxidante em % em volume

Amostras	LSP1	LSP2	LSP3	LSP4	LSP5	LSP6
Ag	0,0012	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,2834
Al	26,3927	30,1892	28,3438	25,0886	29,4710	3,7872
As	0,0082	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0586
Ca	0,5303	0,4545	1,1359	0,3117	0,1157	1,5447
Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,1997
Cl	0,4505	0,3669	0,8164	0,0157	0,3908	12,8121
Cr	0,0456	0,0332	0,0390	0,0287	0,0173	0,2819
Cu	0,6330	0,6704	0,6973	0,7259	0,6530	13,2142
Fe	0,0889	0,1141	0,1018	0,0993	0,0913	0,9956
Hg	0,0624	0,0402	0,0408	0,0613	0,0319	0,6966
Ni	0,0888	0,0611	0,0641	0,0642	0,0677	0,7173
Pb	0,0467	0,0254	0,0251	0,0311	0,0235	0,5376
Si	24,5264	19,7714	21,2701	26,5839	21,0303	31,1863
Ti	0,0108	0,0276	0,0310	0,0471	0,0067	0,2208
Tl	0,0349	0,0251	0,0260	0,0264	0,0288	0,5366

Fonte: Própria

Analisando a Tabela 12, todos os elementos apresentados na Tabela 11 também se fazem presente nestas análises sem apresentar nenhum novo elemento. O experimento 6 apresentou valores muito diferente dos outros experimentos, dessa forma será desconsiderado.

Comparando entre os volumes finais, o aumento no volume da solução final ocasionou uma diminuição no teor dos elementos Ca, Cl e Cr. Isso pode ser provocado pela diminuição da concentração dos elementos na solução com a adição de mais água. Para todos os outros elementos, não houve alterações relevantes e os valores se mantiveram no mesmo patamar o que pode indicar que para esses elementos é indiferente o volume final da solução na capacidade de extração desses elementos das PCIs.

Quando se compara as duas lixiviações, a ácida e a ácida com agente oxidante, é possível observar que os elementos Ag, As e Cd foram praticamente extraídos na lixiviação ácida. Os elementos Cr, Fe, Hg, Ni, Pb, Ti e Tl obtiveram teor mais elevado nas lixiviações ácidas do que nas lixiviações ácidas com agente oxidante. Isso leva ao indicativo de a extração desses elementos se dá de forma eficaz somente com a adição do ácido, sem necessidade do agente oxidante.

Ca e Cl obtiveram teores variáveis para ambas as lixiviações o que pode indicar que para esses elementos a variação do volume e a composição da solução lixiviante não afeta o potencial de extração. Para Al e Si, a adição do agente oxidante potencializou a extração desses elementos aumentando o teor deles nas amostras.

Por fim, o Cu, nesta análise, apresentou comportamento distinto do esperado e do apresentado nas análises de ICP-OES. Nessas análises, o teor de cobre reduziu na lixiviação ácida com agente oxidante. O aumento da concentração de Al e Si pode ter influenciado no teor de cobre, além de que pode ter havido interferência com tantos elementos distintos.

#### 4.6 RELAÇÃO DE EXTRAÇÃO DOS METAIS E VALORAÇÃO

Com os dados obtidos pelo ICP-OES juntamente com os dados das lixiviações, é possível calcular a relação de extração dos elementos em relação a massa inicial de PCI. O resultado é apresentado na Tabela 13 na forma de g de elemento por kg de PCI.

Tabela 13 – Extração média de metais em g/kg de PCI

Elementos	150 ml	250 ml
Al	2,579	5,105
B	0,906	1,238
Ca	7,747	10,753
Cu	42,875	82,398
Fe	3,552	4,265
Gd	N.D.	0,475
K	0,820	N.D.
Li	0,493	N.D.
Ni	0,515	N.D.
Rb	0,952	N.D.
Si	1,300	0,945
Sn	0,069	N.D.
Ti	0,007	0,045
Zn	3,022	3,845

Fonte: Própria

Com os resultados apresentados na Tabela 13, é possível descrever quais são os metais que podem ser recuperados em maior quantidade ao ser utilizado o método de extração estudado neste trabalho. Em primeiro lugar, têm-se o Cu que é o foco de estudo deste trabalho, seguido por Ca, Fe, Zn e Al.

Consultando os valores de mercados dos metais Cu, Zn, Fe e Al, que são os mais utilizados nas partes metálicas dos componentes eletrônicos, é possível obter o valor agregado desses elementos. Supondo-se que seja possível recuperar 100% dos metais presente no licor, a Tabela 14 apresenta o resultado do cálculo dessa valoração em US\$.

Tabela 14 - Valor agregado dos metais extraídos

Elementos	Extração em 150 mL (kg/t)	Extração em 250 mL (kg/t)	Preço de mercado (US\$/t)	Valor - Extração 150 mL (US\$)	Valor - Extração 250 mL (US\$)
Cu	42,875	82,398	8509,00	364,82	701,12
Zn	3,022	3,845	3048,00	9,21	11,72
Fe	3,552	4,265	926,00	3,29	3,95
Al	2,579	5,105	2253,50	5,81	11,50
Total				383,14	728,30

Fonte: London Metal Exchange (2023b, 2023d, 2023e, 2023f)

Observa-se na Tabela 14 que o cobre é o metal mais relevante na agregação de valor do licor quando em comparação com os outros metais extraídos. Esse resultado já era esperado uma vez que o cobre é o metal que está presente majoritariamente na liga metálica utilizada nos circuitos elétricos da PCI, além de ser o metal que em massa consegue ser melhor extraído pelo processo utilizado neste trabalho.

É válido ressaltar que apesar da extração do cobre ter sido proeminente, faz-se necessário investigar a presença do cobre na PLP após a lixiviação ácida com agente oxidante. Segundo Gerbase e Oliveira (2012), as PCIs possuem em média 14% de cobre em sua massa. Ao se utilizar cerca de 20 g de PCIs moídas, espera-se que a massa de cobre extraída seja em torno de 2,8 g o que não ocorreu nesse trabalho. As massas de extração de cobre foram de 0,858 g para 150 mL e 1,645 g para 250 mL, indicando a possibilidade de haja cobre na PLP que não foram dissolvidos.

Uma possível solução para este problema, além da utilização de um moedor para as placas, é também a aplicação de outra lixiviação ácida com agente oxidante para que se possa extrair completamente o cobre da PLP.

## 5 CONCLUSÕES

Diante do que foi exposto, foi possível realizar as lixiviações descritas no trabalho. Fez-se a análise do licor obtido e constatou-se a presença de diversos metais, entre eles: Ag, Al, As, B, Ca, Cd, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Gd, K, Li, Ni, Pb, Rb, Si, Sn, Ti, Tl e Zn. Já para a placa *in natura* e para as polpas das lixiviações foram encontrados os seguintes elementos: Ag, Al, As, Ba, Br, Ca, Cl, Cr, Cu, Fe, Hg, Ni, Pb, Rb, Si, Sn, Sr, Ti e Tl.

Calculou-se o rendimento da extração em g de elemento por kg de PCI moída, sendo que o maior valor obtido foi para o cobre de 42,875 g/kg para 150 mL de solução e 82,398 g/kg para 250 mL de solução.

Através dos dados presente na literatura, notou-se que é necessário aprimorar os processos de lixiviação para que haja uma maior eficiência na extração especialmente no aspecto de moagem que neste trabalho não foi desenvolvido de modo satisfatório. Isso penalizou todos os seguintes aspectos do processo e também as análises aplicadas.

Também se comparou os resultados com o descrito na literatura e constatou-se que o trabalho se encontra em concordância com as pesquisas feitas por Correa *et al.* (2018), C. Silva *et al.* (2020) e Moraes (2011) que tratam desse mesmo processo.

Além dos objetivos específicos alcançados, ainda foi possível obter o valor agregado dos principais metais presente no licor, sendo que o cobre, devido a sua alta extração, foi o elemento que mais cooperou para o valor agregado. Cooperando com US\$ 364,82 para a extração com 150 mL de volume e US\$ 701,12 para a de 250 mL.

Por fim, a investigação da recuperação do cobre a partir de PCIs foi realizada. Onde a melhor via de extração para esse trabalho, deu-se quando é feita uma lixiviação em série, uma ácida e outra ácida com agente oxidante, com um volume de solução final de 250 mL.

## 6 PERSPECTIVAS

Como sugestão para trabalhos futuros, levanta-se os seguintes tópicos:

- Estudo de um sistema com maior controle de temperatura;
- Alteração da concentração de trabalho do ácido sulfúrico e do peróxido de hidrogênio e sua influência na extração;
- Processos de cristalização dos metais obtidos no licor.

## REFERÊNCIAS

- ABBONDANZA, M. N. M.; SOUZA, R. G. Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil. **Waste Management**, v. 85, n.1, p. 374-384, 2019.
- ABDELBASIR, S. M. *et al.* Status of electronic waste recycling techniques: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 1, p. 16533-16547, 2018.
- ALMEIDA, F. S. *et al.* Recuperação de metais presentes em lixo eletrônico. *In: XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Fortaleza, 2016, Fortaleza. **Anais do XXI Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, Fortaleza: COBEQ, 2016. p.1-8.
- ALVES, R. N. B. **Características da Agricultura Indígena e sua Influência na Produção Familiar da Amazônia**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2001.
- ARAÚJO, M. G. *et al.* A model for estimation of potential generation of waste electrical and electronic equipment in Brazil. **Waste Management**, v. 32, n. 1, p. 335-342, 2012.
- ATKINS, P.; JONES, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- AWA REFINERS LIMITED. **History Of The Printed Circuit Board**. 2016. Disponível em: <<https://www.awarefiners.co.uk/news/news-and-information/history-of-the-printed-circuit-board>>. Acesso em: fev. 2022.
- BACIC, M. J. *et al.* **Manual de técnicas e práticas de gestão estratégica de custos nas pequenas e médias empresas**. São Paulo: CRCSP, 2011.
- BALDÉ, C. P.; FORTI, V.; KUEHR, R. **E-Waste statics Guidelines on classification, reporting and indicators**. 2ª edição. Bonn: United Nations University, 2015.
- BAS, A. D.; YAZICI, E. Y.; DEVICI, H. Recovery of silver from X-ray film processing effluents by hydrogen peroxide treatment. **Hydrometallurgy**, v. 121-124, n. 1, p. 22-27, 2012.
- BERNDT, D.; SPAHRBIER, D. Batteries, 1. General. *In: WILEY-VCH (Ed.). Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*, Weinheim: Wiley-VCH, 2014.
- BEVERSKOG, B.; PUIGDOMENECH, I. **Revised Pourbaix Diagrams for Copper at 5-150 °C**. SKI: Stockholm, 1995.
- BORGES, P. A. F. *et al.* Alquimia experimental. **Química Nova**, v. 43, n. 9, p. 1362-1373, 2020.
- BRANDL, H.; BOSSHARD, R.; WEGMANN, M. Computer-munching microbes: metal leaching from electronic scrap by bacteria and fungi. **Hydrometallurgy**, v. 59, n. 2-3, p. 319-326, 2001.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 03 ago. 2010. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: mar. 2023.

BRASIL. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. **Diário Oficial da União**, Poder Executivo, Brasília, DF, 13 fev. 2020. Disponível em: <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10240.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10240.htm)>. Acesso em: mar. 2023.

BROOKINS, D. G. **Eh-pH Diagrams for Geochemistry**. Heidelberg: Springer Berlin, 1988.

BROWN, T. L.; LEMAY, H. E.; BURSTEN, B. E. **Química, a ciência central**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BURDETT, J. K.; SEVOV, S. Stability of the Oxidation States of Copper. **Journal of American Chemical Society**, v. 117, n. 1, p. 12788-12792, 1995.

BUSCAGLIA, V.; RANDALL, C. A. Size and scaling effects in barium titanate. An overview. **Journal of the European Ceramic Society**. v. 40, n. 11, p 3744-3758, 2020.

CALDAS, M. P. K. *et al.* Placas de circuito impresso: caracterização e valor agregado. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, v. 16, n. 2, p. 203-211, 2019.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Material Science and Engineering: An Introduction**. 10ª ed. New Jersey: Wiley, 2018.

CEGALLA, D. P. **Novíssima Gramática da Língua Portuguesa: Edição com gabarito**. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 2020

CIMINELLI, V. S. T. Hidrometalurgia. *In*: FERNANDES, F. R. C. et al. (Org.). **Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007. cap. 4.

COMPANHIA SIDERÚRGICA DE TURABÃO. **Mecânica: Materiais Metálicos e Não Metálicos**. Espírito Santo: SENAI, 1996.

CORREA, M. M. J. *et al.* Separation of copper from a leaching solution of printed circuit boards by using solvent extraction with D<sub>2</sub>EHPA. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 30, n. 3, p. 919-930, 2018.

CREMASCO, M. A. **Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidomecânicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

DIAS, P.; BERNARDES, A. M.; HUDA, N. e-Waste Management and Practices in Developed and Developing Countries. *In*: HOLUSZKO, M. E.; KUMAR, A.; ESPINOSA, D. C. R. (Org.) **Electronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future**. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. cap. 2.

DOEBRICH, J. **Copper — A Metal for the Ages**. Virgínia: USGS, 2009.

EIGENHEER, E. E. **A história do lixo – a limpeza urbana através dos tempos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.

ELECTROLUX. Placa Circuito Impresso Refrigerador Electrolux Side by Side – SH70B SH70X. 2022. Disponível em: < [https://loja.electrolux.com.br/placa-circuito-impresso-side-by-side-sh70b-sh70x/p?idsku=2003681&utm\\_medium=afiliados&utm\\_source=lomadee&utm=true&mobile=4](https://loja.electrolux.com.br/placa-circuito-impresso-side-by-side-sh70b-sh70x/p?idsku=2003681&utm_medium=afiliados&utm_source=lomadee&utm=true&mobile=4)>. Acesso em: mar. 2022.

ESPINOSA, D. C. R.; OLIVEIRA, R. P.; MARTINS, T. A. G. Recycling Technologies – Hydrometallurgy. *In*: HOLUSZKO, M. E.; KUMAR, A.; ESPINOSA, D. C. R. (Org.) **Electronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future**. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. cap. 8.

EUROPEAN UNION. DIRECTIVE 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Official Journal of the European Union**, Bruxelas, 2003.

EUROPEAN UNION. DIRECTIVE 2012/19/EU OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). **Official Journal of the European Union**, Bruxelas, 2012.

FLANAGAN, D. M. **2016 Minerals Yearbook: Copper [Advance Release]**. Virgínia: U. S. Geological Survey, 2021.

FONTENELLE, I. A. **Cultura do Consumo: Fundamentos e Formas Contemporâneas**. Rio de Janeiro: FGV, v. 1. p. 220, 2017.

FORTI, V. *et al.* **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential**. United Nations University: Bonn, 2020.

GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. **Quim. Nova**, v. 35, n. 7, p. 1486-1492, 2012.

GIESE, E. C. Biolixiviação: uma avaliação das inovações tecnológicas na biomineração de minerais sulfetados no período de 1991 a 2015. **Tecnol. Metal. Mater. Miner.**, v. 14, n. 3, p. 192-203, 2017.

GOMES, L. S.; FURTADO, A. C. R.; SOUZA, M. C. A Sílica e suas Particularidades. **Rev. Virtual Quim.**, v. 10, n. 4, p. 1018-1038, 2018.

GOMES, R. F.; PEREIRA, M. M.; LEÃO, V. A. Aplicação de planejamentos experimentais multivariados à lixiviação de cobre presente em placas de circuito impresso. **Tecnol. Metal. Mater. Min.**, v. 17, n. 4, 2020.

- GUPTA, C. K. **Chemical Metallurgy: Principles and Practice**. Weinheim: WILEY, 2003.
- HABASHI, F. A short history of hydrometallurgy. **Hydrometallurgy**, v. 79, n. 1, p. 15–22, 2005.
- HAVLÍK, T. **Hydrometallurgy: Principles and applications**. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2008.
- HERINGER, V. **O amor dos homens avulsos**. São Paulo: Companhia das Letras, 2016.
- HOLUSZKO, M. E. *et al.* Introduction, Vision, and Opportunities. *In*: HOLUSZKO, M. E.; KUMAR, A.; ESPINOSA, D. C. R. (Org.) **Eletronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future**. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. cap. 1.
- HOUSE, C. I.; KELSALL, G. H. Potential-pH diagrams for the Sn/H<sub>2</sub>O-Cl system. **Electrochimica Acta**, v. 29, n. 10, p. 1459-1464, 1984.
- JADHAV, U.; HOCHENG, H. Hydrometallurgical Recovery of Metals from Large Printed Circuit Board Pieces. **Scientific Reports**, v. 5, n. 14754, p. 1- 9, 2015.
- JANSSENS, K. Methods 4: elemental analysis (AAS/AES/X-ray fluorescence). *In*: GAUGLITZ, G; VO-DINH, T. (Org.) **Handbook of Spectroscopy**. Weinheim: Wiley-VCH, 2003, cap. 11.
- JORGE, A. S. S. **Recuperação de cobre em Placas de Circuito Impresso: Lixiviação por percolação usando uma solução amoniacal**. Dissertação de Mestrado. Porto: Universidade do Porto, 2019.
- KEMERICH, P. D. C. *et al.* Fibras de vidro: caracterização, disposição final e impactos ambientais gerados. **Ver. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. v. 10, n. 10, p. 2112-2121, 2013.
- KUMAR, A.; HOLUSZKO, M. E.; JANKE, T. Analysis of rejects from waste printed circuit board processing as an alternative fuel for the cement industry. **Waste Management & Research**, v. 39, n. 6, p. 841-848, 2021.
- KUMAR, A.; HOLUSZKO, M. E.; SONG, S. Recycling Technologies – Physical Separation. *In*: HOLUSZKO, M. E.; KUMAR, A.; ESPINOSA, D. C. R. (Org.) **Eletronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future**. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. cap. 6.
- LADOU, J. Printed circuit board industry. **Int. J. Hyg. Environ.-Health**. v. 209. p. 211–219, 2006.
- LEDERER, F. L.; POLLMANN, K. Recycling Technologies – Biohydrometallurgy. *In*: HOLUSZKO, M. E.; KUMAR, A.; ESPINOSA, D. C. R. (Org.) **Eletronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future**. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. cap. 9.
- LEITE, J. Y. P.; ARAÚJO, F. S. D.; SANTOS, E. P. Hidrometalurgia – uma nova demanda para os cursos técnicos de geologia e mineração. *In*: II Jornada Nacional da Produção Científica em Educação Profissional e Tecnológica, 2007, São Luís. **II Jornada Nacional da Produção**

**Científica em Educação Profissional e Tecnológica: Educação profissional e tecnológica e os desafios do desenvolvimento nacional: Livro de resumos**, 2 ed., Brasília: Ministério da Educação, Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica, 2007. p. 140-150.

LEONEL, M. O uso do fogo: o manejo indígena e a piromania da monocultura. **Estudos Avançados**, v.14, 2000.

LI, H.; EKSTEEN, J.; ORABV, E. Hydrometallurgical recovery of metals from waste printed circuit boards (WPCBs): Current status and perspectives – A review. **Resources, Conservation & Recycling**. v. 139. p. 122-139, 2018.

LONDON METAL EXCHANGE . LME Nickel. Disponível em: <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Nickel#Trading+day+summary> Acesso em: mar. 2023a.

\_\_\_\_\_. LME Zinc. Disponível em: <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Zinc#Trading+day+summary> Acesso em: mar. 2023b.

\_\_\_\_\_. LME Tin. Disponível em: <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Tin#Trading+day+summary> Acesso em: mar. 2023c.

\_\_\_\_\_. LME Copper. Disponível em: <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Copper> Acesso em: jun. 2023d.

\_\_\_\_\_. LME Aluminium. Disponível em: <https://www.lme.com/en/Metals/Non-ferrous/LME-Aluminium#Trading+day+summary> Acesso em: jun. 2023e.

\_\_\_\_\_. ME Steel HRC N.America (Platts). Disponível em: <https://www.lme.com/en/Metals/Ferrous/LME-Steel-HRC-N-America-Platts#Trading+day+summary> Acesso em: jun. 2023f.

MELO, P. R. S.; RIOS, E. C. D.; GUTIERREZ, R. M. V. Placa de circuito impresso: mercado atual e perspectivas. Rio de Janeiro: BNDES Setorial, n. 14, p. 111-136, 2001.

MORAES, V. T. **Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometallúrgico de placas de placas de circuito impressos de celulares obsoletos**. Tese de doutorado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

MUNCHEN, D. D.; DIAS, P.; VEIT, H. M. Materials Used in Electronic Equipment and Manufacturing Perspectives. *In*: HOLUSZKO, M. E.; KUMAR, A.; ESPINOSA, D. C. R. (Org.) **Electronic Waste: Recycling and Reprocessing for a Sustainable Future**. Weinheim: Wiley-VCH, 2022. cap. 5.

NASCIMENTO, R. F. *et al.* **Adsorção: Aspectos teóricos e aplicações ambientais**. Fortaleza: Imprensa Universitária, 2020.

NATIONAL CENTER FOR BIOTECHNOLOGY INFORMATION. Aluminum Sulfate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Aluminum-Sulfate> Acesso em: 18 de abr. 2023a.

\_\_\_\_\_. Calcium sulfate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24497> Acesso em: 18 de abr. 2023b.

\_\_\_\_\_. Stannous sulfate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/62643> Acesso em: 18 de abr. 2023c.

\_\_\_\_\_. Copper sulfate pentahydrate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24463> Acesso em: 18 de abr. 2023d.

\_\_\_\_\_. Cupric Sulfate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/24462> Acesso em: 18 de abr. 2023e.

\_\_\_\_\_. Nickel sulfate hexahydrate. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/5284429> Acesso em: 18 de abr. 2023f.

\_\_\_\_\_. Gadolinium. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/element/Gadolinium> Acesso: 13 de jun. 2023g.

\_\_\_\_\_. Boric Acid. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/7628> Acesso em: 13 de jun. 2023h.

\_\_\_\_\_. Arsenic. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Arsenic> Acesso em: 06 de jun. 2023i.

\_\_\_\_\_. Mercury. Disponível em: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/23931> Acesso em: 06 de jun. 2023j.

NAVARRO, R. F. A Evolução dos Materiais. Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v.1, n. 1, p. 01-11, 2006.

OLIVEIRA, D. M. *et al.* **Biolixiviação: utilização de micro-organismos na extração de metais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

PETROVA, T. M. *et al.* Silver recovery from spent photographic solutions by a magnetically assisted particle bed. **Chemical Engineering and Processing**, v. 71, n. 1, p. 83-96, 2013.

PIERONI, M. C.; LEONEL, J.; FILLMANN, G. Retardantes de chama bromados: uma revisão. **Quim. Nova**, v. 40, n. 3, p. 317-326, 2017.

PRISMARK. **THE PRINTED CIRCUIT REPORT**. New York: Prismark Partners LLC, 2022.

RODRIGUES, A. G.; GUNTHER, W. M. R.; BOSCOV, M. E. G. Estimativa da geração de resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos de origem domiciliar: proposição de método e aplicação ao município de São Paulo, São Paulo, Brasil. **Eng Sanit Ambient.**, v.20, n.3, p.437-447, 2015.

RODRIGUES, D. A. C. **Modelagem do processo de autoprecipitação de gipsita em decantadores do processo Bayer**. Dissertação de Mestrado. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2018.

RODRIGUES, M. A.; SILVA, P. P.; GUERRA, W. Cobre. **Química Nova na Escola**, v. 34, n. 3, p. 161-162, 2012.

SCHLESING, M. E. *et al.* **Extractive Metallurgy of Copper**. 6<sup>a</sup> ed. Oxford: Elsevier, 2022.

SERVIÇO GEOLÓGICO DOS ESTADOS UNIDOS. **COPPER**. Virgínia: U. S. Geological Survey, 2021.

SILVA, C. S. M. *et al.* Processing of a metal concentrate from ground waste printed circuit boards in acidic media using hydrogen peroxide as oxidant. **Quim. Nova**, v. 43, n. 7, p. 914-922, 2020.

SILVA, L. A. *et al.* Cobre: produção industrial e aplicações. **Quim. Nova**, v. 42, n. 10, p. 1154-1161, 2019.

SILVA, M. L. L. *et al.* Risco Ambiental e Biotecnologia na Recuperação de Metais da Placa de Circuito Impresso (PCI). **Braz. Ap. Sci. Rev.**, v. 4, n. 4, p. 2494-2505, 2020.

SMART, L. E.; MOORE, E. A. **Solid State Chemistry: an introduction**. Boca Raton: CRC Press, 2012.

SOUZA, J. I. **Introdução a Hidrometalurgia**. Ceará: Escola Estadual de Educação Profissional – EEEP, 2013.

WILLNER, J. *et al.* Studies on the Content of Selected Technology Critical Elements (Germanium, Tellurium and Thallium) in Electronic Waste. **Materials**, v. 14, n. 3722, p. 1-16, 2021.

ZANIRATO, S. H.; ROTONDARO, T. Consumo, um dos dilemas da sustentabilidade. **Estudos Avançados**, v. 30, 2016.

ZHANG, K.; SCHNOOR, J. L.; ZENG, E. Y. E-Waste Recycling: Where Does It Go from Here? **Environ. Sci. Technol.** v. 46, n. 20, p. 10861-10867, 2012.

## APÊNDICE

### APÊNDICE A – Medição da largura, altura e massa das PCIs

Granulometria PCI's														
	Altura (cm)	Largura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Massa (g)		Altura (cm)	Largura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Massa (g)		Altura (cm)	Largura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Massa (g)
1	0,410	0,655	0,269	0,2001		21	0,165	0,735	0,121		41	0,340	0,560	0,190
2	0,405	0,800	0,324	0,1343		22	0,590	0,700	0,413		42	0,290	1,050	0,305
3	0,100	0,985	0,099	0,1228		23	0,510	0,840	0,428		43	0,170	0,570	0,097
4	0,385	0,950	0,366	0,2408		24	0,290	0,920	0,267		44	0,600	0,740	0,444
5	0,390	0,470	0,183	0,1771		25	0,510	0,700	0,357		45	0,240	0,890	0,214
6	0,070	0,550	0,039	0,0828		26	0,170	0,580	0,099		46	0,645	0,775	0,500
7	0,120	0,720	0,086	0,1023		27	0,660	0,720	0,475		47	0,410	1,000	0,410
8	0,245	0,600	0,147	0,1341		28	0,320	0,555	0,178		48	0,310	0,620	0,192
9	0,210	0,560	0,118	0,1047		29	0,215	0,510	0,110		49	0,350	0,635	0,222
10	0,320	0,600	0,192	0,1550		30	0,110	0,790	0,087		50	0,150	0,590	0,089
11	0,530	0,950	0,504	0,2749		31	0,380	0,550	0,209		51	0,350	0,370	0,130
12	0,530	0,700	0,371	0,2668		32	0,165	0,365	0,060		52	0,225	1,340	0,302
13	0,210	0,900	0,189	0,1852		33	0,365	0,490	0,179		53	0,140	0,655	0,092
14	0,385	1,500	0,578	0,2903		34	0,275	0,845	0,232		54	0,290	0,725	0,210
15	0,230	0,675	0,155	0,1272		35	0,310	0,580	0,180		55	0,280	0,990	0,277
16	0,355	0,660	0,234	0,1532		36	0,445	0,775	0,345		56	0,210	0,480	0,101
17	0,140	0,775	0,109	0,1055		37	0,545	0,600	0,327		57	0,140	0,590	0,083
18	0,670	0,925	0,620	0,3454		38	0,420	0,490	0,206		58	0,160	0,490	0,078
19	0,530	0,720	0,382	0,2939		39	0,335	0,970	0,325		59	0,420	0,590	0,248
20	0,420	1,210	0,508	0,2484		40	0,130	0,845	0,110		60	0,270	0,530	0,143

Dimensionamento	Altura (cm)	Largura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Massa (g)
Média	0,326	0,728	0,242	0,1806
Desvio-padrão	0,153	0,219	0,142	0,0667
Amplitude	0,600	1,135	0,581	0,2569