



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
DO AMAPÁ  
CURSO DE TECNOLOGIA EM MINERAÇÃO

GABRIEL DA SILVA DIAS  
RENAN POMBO DA SILVA

**EXTRAÇÃO DE COBRE DE COMPONENTES ELETRÔNICOS  
POR MÉTODO HIDROMETALÚRGICO**

MACAPÁ-AP  
2025

GABRIEL DA SILVA DIAS  
RENAN POMBO DA SILVA

**EXTRAÇÃO DE COBRE DE COMPONENTES ELETRÔNICOS  
POR MÉTODO HIDROMETALÚRGICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado junto ao curso de Tecnologia em Mineração do Instituto Federal do Amapá, campus Macapá, como requisito para obtenção do certificado de tecnólogo em mineração.


Orientador: Prof. Dr. Franciulli da Silva Dantas de Araújo.

# EXTRAÇÃO DE COBRE DE PLACAS DE CIRCUITO INTEGRADO POR MÉTODO HIDROMETALÚRGICO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Tecnologia em Mineração, como requisito avaliativo para obtenção do título de Tecnólogo em Mineração.


Orientador: Dr. Franciulli da Silva Dantas de Araújo

## BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente  
 FRANCIOULLI DA SILVA DANTAS DE ARAUJO  
Data: 23/05/2025 08:54:31-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Prof. Dr. Franciulli da Silva Dantas de Araújo (Orientador)  
Instituto Federal do Amapá – IFAP

Documento assinado digitalmente  
 LUIS ALBERTO SILVA  
Data: 23/05/2025 09:01:36-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


---

Me. Luís Alberto Silva  
(Avaliador) CIT-SENAI/MG

Documento assinado digitalmente  
 THIAGO BARRETO DA SILVA AMARAL  
Data: 23/05/2025 14:17:47-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Thiago Barreto da Silva Amaral  
(Avaliador) Instituto Federal do Amapá –  
IFAP

Documento assinado digitalmente  
 TIAGO LINUS SILVA COELHO  
Data: 25/05/2025 08:29:16-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

---

Dr. Tiago Linus Silva Coelho (Avaliador)  
Instituto Federal do Amapá – IFAP

Apresentado em: 21 / 05 / 2025  
Conceito/Nota: 97

## RESUMO

Este trabalho propõe um método hidrometalúrgico para a extração de cobre de placas de circuito impresso (PCIs) de computadores e telefones celulares, utilizando ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) em três concentrações (1, 2 e 3 mol/L) e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) como agente oxidante. As amostras passaram por pré-tratamento, lixiviação controlada por 6 horas a 75–85 °C e titulação complexométrica com EDTA para quantificação do cobre extraído. Os melhores resultados foram obtidos com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  a 1 mol/L, com concentração de cobre extraído alcançando até 118,14 g/L. A curva de calibração apresentou alta confiabilidade ( $R^2 = 0,99$ ), e a análise estatística (ANOVA e Two-way ANOVA) confirmou o tempo de reação como o fator mais influente, explicando aproximadamente 67% da variação nos resultados. Também foram observadas variações visuais nas soluções (bege, verde e azul), indicando possíveis interferências de outros metais. Os dados obtidos permitiram sugerir parâmetros operacionais com maior eficiência, menor uso de reagentes e impacto ambiental reduzido, contribuindo para soluções práticas e sustentáveis na reciclagem de lixo eletrônico.

Palavras-chave: lixiviação ácida; hidrometalurgia; placas de circuito impresso; cobre; resíduos eletrônicos.

## ABSTRACT

This study proposes a hydrometallurgical method for extracting copper from printed circuit boards (PCBs) of computers and mobile phones, using sulfuric acid ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) at three different concentrations (1, 2, and 3 mol/L) and hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) as the oxidizing agent. The samples underwent pre-treatment, controlled leaching for 6 hours at 75–85 °C, and complexometric titration with EDTA to quantify the extracted copper. The best results were obtained with  $\text{H}_2\text{SO}_4$  at 1 mol/L, reaching copper concentrations of up to 118.14 g/L. The calibration curve showed high reliability ( $R^2 = 0.99$ ), and statistical analysis (ANOVA and two-way ANOVA) confirmed reaction time as the most influential factor, explaining approximately 67% of the variation in the results. Visual changes in the solutions (beige, green, and blue) indicated possible interference from other metals. The results allowed the proposal of optimized operational parameters with greater efficiency, reduced reagent consumption, and lower environmental impact, contributing to practical and sustainable solutions for electronic waste recycling.

Keywords: acid leaching; hydrometallurgy; printed circuit boards; copper; electronic waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma do processo realizado.....	18
Figura 2 – Desenho do circuito no lado cobreado.....	19
Figura 3 – Placa sem o pré-tratamento.....	20
Figura 4 – Placa após pré-tratamento.....	20
Figura 5 – Quebra manual das placas.....	21
Figura 6 – Moinho de martelo.....	21
Figura 7 – Peneiras Tyler.....	22
Figura 8 – Material de interesse retido na peneira.....	23
Figura 9 – Ácido sulfúrico diluído.....	24
Figura 10 – Montagem das vidrarias para o ensaio de lixiviação.....	24
Figura 11 – Imersão da amostra sólida em ácido.....	25
Figura 12 – Alíquotas diluídas.....	26
Figura 13 – Mudança de cor da solução após o ponto final da titulação.....	27
Figura 14 – Gráfico da curva de calibração.....	28
Figura 15 – Gráfico de interação para concentração de cobre (g/L).....	31
Figura 16 – Gráfico de concentração de cobre (g/L) comparado ao tempo (min) .....	32
Figura 17 – Gráfico de variação de concentração de cobre na análise das alíquotas.....	32
Figura 18 – Comparação de cor das soluções que indica uma possível extração de outros metais.....	33

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de EDTA de cada alíquota na titulação.....	27
Tabela 2 – Curva de Calibração.....	28
Tabela 3 – Extração de cobre por concentrações de ácido sulfúrico.....	30

## LISTA DE SIGLAS

CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
D2EHPA	Ácido Di(2-etil-hexil) fosfórico
EDTA	Ácido etilenodiaminotetracético
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Peróxido de hidrogênio
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico
IFAP	Instituto Federal do Amapá
PCIs	Placas de Circuito Impresso
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ROHS	Restrição de Substâncias Perigosas

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1</b>	<b>Lixo eletrônico.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2</b>	<b>Importância da Reciclagem de Eletrônicos.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3</b>	<b>Composição de Placas de Circuito Impresso.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Hidrometalurgia.....</b>	<b>14</b>
<b>2.5</b>	<b>Hidrometalurgia para Extração de Placas de Circuito Impresso.....</b>	<b>16</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>18</b>
<b>3.1</b>	<b>Seleção das placas.....</b>	<b>19</b>
<b>3.2</b>	<b>Pré-Tratamento.....</b>	<b>19</b>
<b>3.3</b>	<b>Cominuição.....</b>	<b>21</b>
<b>3.4</b>	<b>Caracterização.....</b>	<b>22</b>
<b>3.5</b>	<b>Lixiviação Ácida.....</b>	<b>23</b>
<b>3.6</b>	<b>Análise de Cobre Por Titulometria.....</b>	<b>25</b>
<b>3.7</b>	<b>Análise estatística dos dados.....</b>	<b>29</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>30</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>34</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>36</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A baixa taxa de reaproveitamento de metais valiosos presentes em resíduos eletroeletrônicos representa uma perda econômica significativa e um desafio ambiental crescente. O Brasil, quinto maior gerador de lixo eletrônico do mundo, enfrenta limitações na infraestrutura de coleta, tratamento e reciclagem desses resíduos (Forti et al., 2020).

Dentre os componentes descartados, as placas de circuito impresso (PCIs) de computadores e celulares merecem destaque por sua elevada concentração de metais como o cobre, essencial para setores industriais e de tecnologia (Chiaradia et al., 2021).

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, na prática, a extração de cobre presente em PCIs de celulares por meio de hidrometalurgia. Utilizou-se a lixiviação ácida com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) em três concentrações diferentes (1 mol/L, 2 mol/L e 3 mol/L), combinadas ao peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ) como agente oxidante.

A pesquisa analisa como a concentração do ácido e o tempo de reação afetam a eficiência da extração do cobre, sendo o tema justificado pela necessidade de alternativas técnicas e sustentáveis para recuperar metais valiosos. A extração de cobre a partir de resíduos eletrônicos reduz os impactos da mineração, fortalece a economia circular e incentiva o uso consciente dos recursos (Pereira et al., 2019).

Os ensaios foram conduzidos nos laboratórios do Instituto Federal do Amapá (IFAP), onde as placas passaram por pré-tratamento, lixiviação em condições controladas e titulação complexométrica com EDTA para quantificação do cobre extraído. Os dados obtidos permitiram gerar uma curva de calibração e calcular as concentrações reais de cobre (em g/L) ao longo de diferentes tempos de reação.

Os resultados permitiram identificar as condições operacionais mais favoráveis à extração, com destaque para o tempo de reação como variável decisiva. As análises estatísticas aplicadas (Two-way ANOVA e ANOVA) deram suporte à interpretação dos dados. Além disso, observações práticas indicaram interferências visuais e químicas causadas por outros metais presentes nas soluções. Com base nessas observações práticas, propõem-se parâmetros

otimizados, priorizando eficiência metalúrgica, economia de reagentes e menor impacto ambiental, com potencial uso em escalas laboratorial e industrial.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Lixo eletrônico**

O termo lixo eletrônico, também conhecido como resíduo eletrônico ou e-lixo, refere-se a dispositivos eletroeletrônicos descartados, como computadores, celulares, televisores, baterias e placas de circuito impresso (PCIs). Esses equipamentos deixam de ser utilizados por apresentarem defeitos, obsolescência ou simplesmente por serem substituídos por versões mais modernas. O lixo eletrônico é caracterizado por conter uma ampla variedade de materiais, incluindo metais preciosos e pesados, plásticos e componentes tóxicos, o que o torna tanto uma fonte valiosa de matéria-prima quanto um risco ambiental e à saúde pública quando descartado de forma inadequada (Ferreira *et al.*, 2010). O avanço tecnológico acelerado, aliado à redução da vida útil dos aparelhos eletrônicos, contribui significativamente para o aumento desse tipo de resíduo em todo o mundo (Forti *et al.*, 2020).

### **2.2 Importância da Reciclagem de Eletrônicos**

Diante do crescimento expressivo na geração de lixo eletrônico, a sua reciclagem torna-se uma alternativa viável e necessária para mitigar os impactos ambientais e promover o reaproveitamento de materiais valiosos. Conforme indicado por Mattos, José e Perales (2008), a área de informática não era tradicionalmente considerada uma indústria poluidora. No entanto, o rápido avanço tecnológico trouxe a obsolescência acelerada dos dispositivos eletrônicos, proporcionando uma redução significativa do seu ciclo de vida útil e gerando grandes volumes de resíduos eletrônicos. Esse aumento no lixo eletrônico é uma das principais preocupações dos ambientalistas e afeta a implementação de novas políticas por órgãos e empresas Montes *et al.* (2011).

A reciclagem surge como uma alternativa viável, buscando recuperar materiais que foram descartados e aproveitá-los como matéria-prima, o que economizou custos durante o processo produtivo. No Brasil, ainda há um longo caminho a ser percorrido para atingir metas satisfatórias de produção e consumo de produtos feitos a partir de materiais reciclados. Incentivar as pessoas a

priorizarem a compra desses produtos em casa poderia motivar as indústrias a continuarem utilizando processos de produção que incorporam matérias-primas recicladas (Montes *et al.*,2011). Segundo Portilho *et al.* (2005), acredita-se que o consumo sustentável deve substituir o consumo reduzido, enfatizar a reciclagem, o uso de tecnologias limpas e reduzir excessos desnecessários, e consolidar o mercado verde.

Os mercados emergentes do século XXI mostram interesse na produção de produtos ecológicos, consideram as consequências públicas das suas ações e procuram empresas que promovam a transformação social e ecológica. Nesse contexto, foram desenvolvidas normas para transformar indústrias e mercados em setores “verdes” (Pereira *et al.* 2014).

O CONAMA determina que os materiais que possam poluir o meio ambiente devem ser descartados de maneira adequada. A Resolução 257 desse órgão determina que as pilhas e outros materiais que contenham chumbo, cádmio, mercúrio e substâncias similares devem, quando esgotados, ser entregues ao órgão que os vendeu ou à assistência técnica autorizada, garantindo assim a destinação correta e a reciclagem adequada (CONAMA, 1999).

Em 2021, o Brasil gerou aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de lixo eletrônico, tornando-se o maior produtor desse resíduo da América Latina. A infraestrutura de reciclagem do país continua inadequada, com poucas empresas especializadas e a escassez de pontos de recolha adequados. A falta de coleta seletiva em muitas áreas dificulta uma reciclagem eficiente. A PNRS, instituída pela Lei nº 12.305/2010, é a principal diretriz para a gestão de resíduos sólidos e tem como objetivo promover a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Em 2020, a Resolução 481 do CONAMA enfatizou a importância da logística reversa e da responsabilidade do produtor quanto ao destino final do produto (CONAMA, 2017).

Projetos como o Recicla Sampa, em São Paulo, conscientizam sobre a reciclagem do lixo eletrônico, enquanto empresas como a Green Eletron lideram iniciativas de coleta e reciclagem, buscando parceiros para ampliar a infraestrutura. No entanto, existem desafios, como a falta de sensibilização do público, infraestruturas inadequadas e aplicação inconsistente das leis. A sensibilização do público é crucial, sendo necessário investimento em

infraestrutura e novas tecnologias para tornar a reciclagem do lixo eletrônico mais eficiente. Com aplicação rigorosa da PNRS e campanhas educativas para incentivar a participação na coleta seletiva, o potencial de expansão da indústria brasileira de reciclagem é enorme. A reciclagem de lixo eletrônico no Brasil está avançando, mas ainda há muito trabalho a ser feito para alcançar uma gestão eficaz e sustentável (Recicla Sampa, 2024; Green Eletron, 2022).

### **2.3 Composição de Placas de Circuito Impresso**

Os metais não ferrosos presentes nas placas de circuito impresso do lixo eletrônico são motivo de grande preocupação devido ao seu valor econômico e importância na reciclagem de eletrônicos. Dentre esses metais, o cobre é um dos elementos mais importantes, tanto em quantidade quanto em valor (CHIARADIA; AMARAL; DUARTE, 2021; PEREIRA et al., 2019).

O cobre é o metal não ferroso mais abundante em PCIs e é usado principalmente para formar traços e caminhos que conduzem eletricidade entre os diferentes componentes da placa. Suas propriedades como alta condutividade elétrica e térmica, durabilidade e ductilidade o tornam ideal para aplicações eletrônicas (Balde *et al.*, 2020). Além disso, o cobre é altamente reciclável, com processos de reaproveitamento capazes de recuperar até 95% do metal presente no lixo eletrônico, economizando energia e recursos naturais em comparação à extração do material virgem (Abrelpe, 2021).

Além do cobre, outros metais não ferrosos presentes em PCIs incluem o ouro, utilizado em pequenas quantidades para revestir contatos e conectores devido à sua excelente condutividade elétrica e resistência à corrosão; prata, utilizada em contatos e conectores devido à sua excelente condutividade elétrica; estanho, uma solda utilizada principalmente para conectar componentes eletrônicos a placas de circuito, utilizado em capacitores e conectores cerâmicos devido à sua resistência à corrosão e boas propriedades catalíticas. Chumbo tradicionalmente utilizado para soldagem, embora devido às regulamentações ambientais (ROHS), seu uso está diminuindo (Pereira *et al.*, 2014).

A reciclagem de cobre de PCIs é economicamente viável e ambientalmente benéfica. O processo envolve a coleta e a separação dos resíduos eletrônicos, seguida pela extração do cobre através de processos piro e hidrometalúrgicos. A

pirometalurgia envolve a fusão dos componentes para separar o cobre de outros materiais, sendo eficiente, mas consumindo muita energia. A hidrometalurgia, por sua vez, utiliza soluções químicas para dissolver o cobre, que é então precipitado e purificado, sendo um processo mais controlável e potencialmente menos energético (CONAMA, 1999).

Os benefícios da reciclagem de cobre podem incluir a economia de matéria-prima, pois reduz-se a necessidade de mineração de cobre, preservando os recursos naturais. Além disso, a produção de cobre reciclado consome significativamente menos energia do que a extração do metal virgem, contribuindo para a redução dos impactos ambientais, minimizando a quantidade de resíduos eletrônicos que acabam em aterros e diminuindo a poluição do solo e da água (Balde *et al.*, 2020).

Portanto, os metais não ferrosos, especialmente o cobre, desempenham um papel crucial nas placas de circuito impresso dos dispositivos eletrônicos. A reciclagem desses metais é essencial para a sustentabilidade ambiental e a economia de recursos naturais e energia (Forti *et al.*, 2020).

## **2.4 Hidrometalurgia**

A hidrometalurgia é um ramo da metalurgia que envolve a extração de metais a partir de minérios ou resíduos metálicos usando soluções aquosas. Esse processo é amplamente utilizado para recuperar metais valiosos de minérios de baixo teor, resíduos industriais e sucata eletrônica. A hidrometalurgia é uma alternativa aos métodos pirometalúrgicos tradicionais e é conhecida por sua eficiência energética e menores impactos ambientais (Abreu *et al.*, 2014).

O processo de hidrometalurgia começa com a extração por solvente, onde o minério ou resíduo metálico é tratado com uma solução aquosa que dissolve os metais desejados. As substâncias utilizadas nesse procedimento incluem ácidos, bases, sais e agentes quelantes. Existem vários tipos de lixiviação, como a dissolução ácida, que emprega compostos como ácido sulfúrico ou clorídrico e é amplamente utilizada na obtenção de metais como cobre e zinco; a extração alcalina, que utiliza soluções como hidróxido de sódio, sendo aplicada à recuperação de elementos como alumínio; e a lixiviação cianetada, que faz uso de cianeto de sódio ou potássio, especialmente na obtenção de ouro (Ritcey,

2006).

Após a lixiviação, a mistura de sólidos e solução lixiviante é separada. O sólido remanescente é removido, deixando uma solução que contém os metais dissolvidos. Esse passo pode ser realizado através de filtração, sedimentação, centrifugação e outras técnicas de separação física. Em seguida, a solução lixiviada pode conter impurezas que precisam ser removidas. A purificação pode envolver precipitação química, troca iônica, adsorção em carvão ativado ou outros métodos. Por exemplo, é comum a remoção de impurezas como ferro, manganês ou sílica (Fuerstenau *et al.*, 2003).

A recuperação de metais a partir de soluções purificadas pode ser realizada por diferentes métodos, como precipitação, eletrodeposição, extração por solvente e cristalização. Na precipitação, reagentes específicos são adicionados para formar compostos insolúveis com os metais, facilitando sua remoção. Já a eletrodeposição utiliza um processo eletroquímico para depositar os metais na forma pura sobre eletrodos, enquanto a extração por solvente emprega substâncias orgânicas para separar seletivamente os metais presentes na solução aquosa (Panda *et al.*, 2013).

A hidrometalurgia se destaca por sua eficiência energética, menor impacto ambiental e flexibilidade na aplicação, além de gerar rejeitos menos tóxicos. Em comparação com a pirometalurgia, seu consumo de energia tende a ser reduzido, especialmente em processos realizados a baixas temperaturas, e suas emissões atmosféricas são mais controladas. Outra vantagem é sua aplicabilidade a diferentes metais e minérios, inclusive aqueles de baixo teor ou composição complexa, que não são viáveis na pirometalurgia. Além disso, os resíduos gerados costumam ser menos nocivos e podem passar por tratamentos que garantem um descarte mais seguro (Abreu *et al.*, 2014).

A hidrometalurgia tem aplicações variadas, incluindo a extração de metais preciosos como ouro, prata e platina a partir de minérios e resíduos eletrônicos, a reciclagem de lixo eletrônico para recuperar cobre, ouro, prata e outros metais valiosos de placas de circuito impresso e outros componentes eletrônicos, e o tratamento de minérios de óxidos e sulfetos para extrair metais como cobre, zinco, níquel e urânio (Fuerstenau *et al.*, 2003).

## 2.5 Hidrometalurgia para Extração de Placas de Circuito Impresso

A hidrometalurgia é amplamente utilizada na recuperação de cobre de placas de circuito impresso (PCIs), presentes no lixo eletrônico. Esse método se destaca por sua eficiência e menor impacto ambiental em comparação com a pirometalurgia, além de demandar menos energia. Diferentes abordagens podem ser aplicadas no processo, como lixiviação ácida, amoniacal e com solventes orgânicos, além da eletro-recuperação, permitindo uma extração seletiva e eficaz do metal. (Panda *et al.*, 2013).

A lixiviação ácida é uma das técnicas mais utilizadas, envolvendo o uso de ácidos fortes para dissolver o cobre presente nas PCIs. O ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) é frequentemente utilizado, muitas vezes em combinação com um agente oxidante, como o peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ). Alternativamente, o ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) pode ser empregado, embora gere gases tóxicos como  $\text{NO}_x$ , exigindo controles ambientais rigorosos (Abreu *et al.*, 2014).

No processo, as PCIs são trituradas para aumentar a área de superfície e imersas em uma solução de ácido sulfúrico ou nítrico, onde o cobre é dissolvido formando sulfato de cobre ( $\text{CuSO}_4$ ) ou nitrato de cobre ( $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ ). (Cunha *et al.*, 2003).

Outro método é a lixiviação amoniacal, que utiliza soluções de amônia para dissolver o cobre de forma seletiva. A amônia em solução aquosa, frequentemente com a presença de agentes oxidantes como oxigênio ou peróxido de hidrogênio, pode dissolver o cobre, formando complexos solúveis de amônio-cupramônio (Ritcey, 2006). Neste processo, as PCIs trituradas são imersas em uma solução de amônia, onde o cobre reage formando esses complexos.

A lixiviação com solventes orgânicos também é uma técnica eficiente, utilizando solventes específicos para extrair cobre. Solventes orgânicos, combinados com agentes de extração como o ácido di-2-etilhexilfosfórico (D2EHPA), são usados para transferir o cobre da fase aquosa para a fase orgânica, de onde pode ser recuperado por processos subsequentes (Fuerstenau *et al.*, 2003).

Após a lixiviação, a eletro-recuperação pode ser empregada para recuperar o cobre a partir da solução lixiviada. A técnica de eletro-obtenção (*electrowinning*)

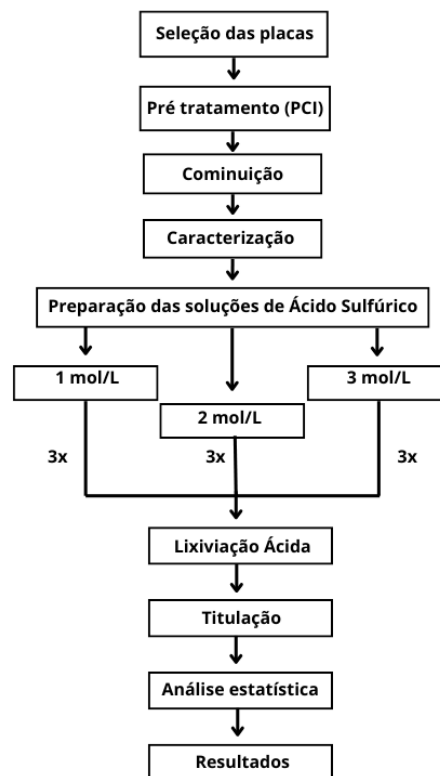
utiliza processos eletroquímicos para depositar cobre metálico puro a partir da solução lixiviada. Neste método, a solução contendo íons de cobre é submetida a eletrodeposição, onde cátodos de cobre atraem os íons de cobre da solução, depositando-os como cobre metálico (Panda *et al.*, 2013).

Os processos de lixiviação utilizados na extração de metais de placas de circuito impresso (PCIs) apresentam características distintas quanto à eficiência e ao impacto ambiental. A lixiviação ácida, amplamente empregada, permite a dissolução eficiente dos metais, mas demanda um rigoroso tratamento dos resíduos gerados. Já a lixiviação amoniacal destaca-se por sua seletividade na recuperação do cobre, reduzindo a corrosividade dos rejeitos, embora exija um controle adequado das emissões gasosas. A lixiviação com solventes orgânicos, por sua vez, apresenta alta eficiência na separação de metais específicos, mas o custo elevado e a toxicidade dos solventes representam desafios para sua aplicação em larga escala. Além disso, a eletro-recuperação permite a obtenção de cobre metálico de alta pureza, sendo um método limpo, desde que precedido por uma lixiviação eficiente (Sousa, 2018; Sesuc, 2025).

### 3 METODOLOGIA

Após a coleta de uma quantidade suficiente de placas de circuito impresso (PCIs) para a realização dos experimentos, iniciou-se o processo de limpeza para remover impurezas que poderiam interferir nos procedimentos subsequentes. Em seguida, os componentes que não eram de interesse para o estudo foram retirados das placas. Com as PCIs devidamente limpas, elas foram fragmentadas manualmente para facilitar a etapa de cominuição. Posteriormente, foi realizada a análise granulométrica, permitindo a seleção do tamanho de partícula adequado para o experimento. O fluxograma do processo realizado pode ser observado na figura 1.

Figura 1 - Fluxograma do processo realizado.



Fonte: Autoria própria (2024)

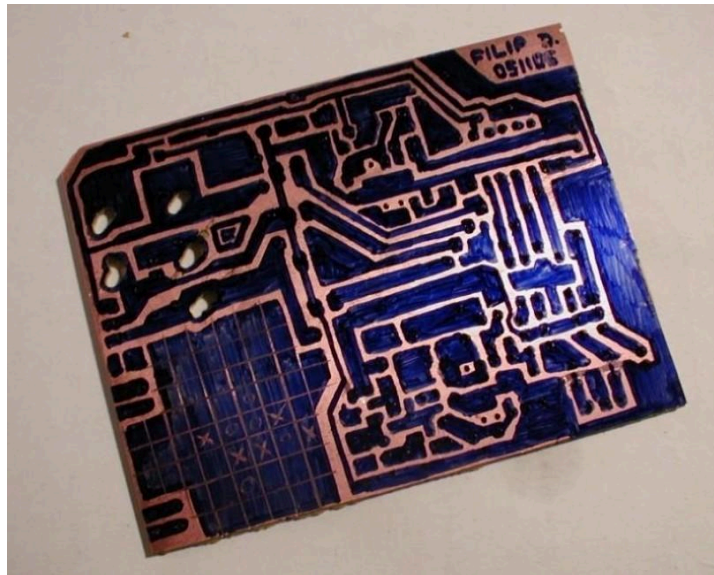
Os ensaios de lixiviação e análise titulométrica foram conduzidos no Laboratório de Química Aplicada à Mineração do Instituto Federal do Amapá (IFAP), enquanto a cominuição das PCIs ocorreu no Laboratório de Processamento Mineral da mesma instituição. O estudo foi dividido em diferentes

etapas experimentais, organizadas conforme segue:

### 3.1 Seleção das placas

Foram coletados 5 kg de PCIs provenientes de equipamentos eletrônicos descartados. Esse tipo de placa foi escolhido devido ao seu elevado teor de cobre, presente principalmente nas trilhas condutoras, o que torna sua reciclagem viável e eficiente.

Figura 2 - Desenho do circuito no lado cobreado.



Fonte: Wikipedia (2025)

### 3.2 Pré-Tratamento

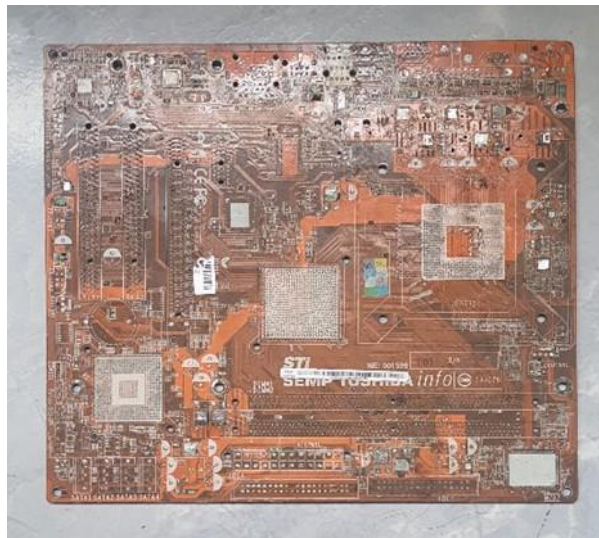
As PCIs coletadas, em sua maioria provenientes de computadores, apresentavam características de alta robustez, grande quantidade de componentes (Figura 3). Para viabilizar o processo subsequente, foi realizado um pré-tratamento, que consistiu na limpeza de resíduos, como poeira. Em algumas placas, foi necessária a lavagem com água destilada e detergente, utilizando uma escova para auxiliar na remoção de impurezas presentes.

Figura 3 - Placa sem o Pré-tratamento



Fonte: Autoria própria (2024)

Figura 4 - Placa após pré-tratamento



Fonte: Autoria própria (2024)

Após a limpeza, todos os componentes foram retirados manualmente das PCIs com o auxílio de um alicate, garantindo que apenas o material da placa fosse destinado ao processo de redução de tamanho. Em seguida, as placas foram quebradas manualmente em fragmentos menores para facilitar sua inserção no moinho de martelo (Figura 5).

Figura 5 - Quebra manual das placas



Fonte: Autoria própria (2024)

### 3.3 Cominuição

O material foi então fragmentado em um moinho de martelo utilizando velocidade moderada de 1760 RPM até alcançar uma granulometria ideal retida em 2,36 mm, conforme indicado no estudo de Silva (2022), que destaca que a redução do tamanho das PCIs otimiza o processo de lixiviação ácida.

Figura 6 - Moinho de martelo.



Fonte: Autoria própria (2024)

Após a etapa de moagem, as placas foram submetidas a análises granulométricas para garantir que os tamanhos desejados fossem obtidos. Essa etapa é fundamental para maximizar a eficiência na extração dos metais valiosos.

### 3.4 Caracterização

A separação granulométrica foi realizada por meio de um processo de peneiramento, utilizando uma série de peneiras Tyler. Foram aplicados os seguintes tamanhos de abertura: **4,75, 2,80, 2,36 e 1,18 mm**.

Figura 7 - Peneiras Tyler.

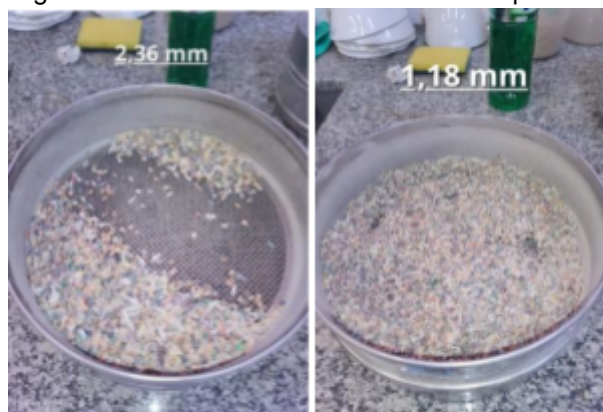


Fonte: Autoria Própria (2024)

A amostra de interesse, composta pelos fragmentos resultantes da etapa de moagem com granulometria inicial média de **2,36 mm**, foi cuidadosamente analisada. Esse procedimento teve como objetivo classificar os diferentes tamanhos de partículas e selecionar aqueles que apresentassem a granulometria ideal para os processos subsequentes.

Foi realizada uma adaptação do método proposto por Silva (2022), utilizando uma composição das frações de 1,18 mm e 2,36 mm. A análise após a separação granulométrica indicou que as partículas que ficaram retidas 2,36 mm, isoladamente, eram insuficientes para o processo de lixiviação ácida. Dessa forma, optou-se por combiná-las com as partículas retidas em 1,18 mm, buscando aumentar a eficiência na recuperação do cobre.

Figura 8 - Material de interesses retido na peneira.



Fonte: Autoria Própria (2024)

### 3.5 Lixiviação Ácida

Para a extração de cobre presente nas PCIs foram utilizadas amostras de 25 g, para o procedimento. A reação foi conduzida com ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) em três concentrações diferentes: 1 mol/L, 2 mol/L e 3 mol/L, utilizando um reagente que já se encontrava fora do prazo de validade, o que pode ter influenciado a eficiência da lixiviação. O peróxido de hidrogênio sciavikko ( $H_2O_2$ ) a 30% foi utilizado como agente oxidante.

Os equipamentos empregados no experimento incluíram balão de fundo redondo 400 mL, chapa de aquecimento com controle de temperatura, agitador magnético com barra magnética, condensador de refluxo e termômetro para monitoramento da temperatura.

Figura 9 - Ácido sulfúrico diluído



Fonte: Autoria própria (2024)

A montagem do sistema experimental consistiu em posicionar o balão de fundo redondo sobre a chapa de aquecimento, adicionar a barra magnética ao balão e conectar o condensador de refluxo para reutilizar o solvente evaporado durante o processo. A montagem adaptada de Silva *et al.* (2015) e mantida por Silva (2022) pode ser observada na Figura 10.

Figura 10 - Montagem das vidrarias para o ensaio de lixiviação



Fonte: Autoria própria (2024)

Durante o experimento, foram realizados ensaios independentes para cada concentração de ácido sulfúrico (1 mol/L, 2 mol/L e 3 mol/L). Em cada ensaio, inicialmente foram adicionados 150 mL da solução de  $H_2SO_4$ , na concentração correspondente, em um balão de fundo redondo. Esse sistema foi mantido sob aquecimento até atingir a temperatura de 75°C. Após a estabilização da

temperatura, foram adicionados 25 g da amostra sólida de placas de circuito impresso (PCIs) ao balão, dando início à reação de lixiviação.

Figura 11 - Imersão da amostra sólida em ácido



Fonte: Autoria própria (2024)

A quantidade de peróxido de hidrogênio necessária foi calculada com base na massa de 25 g de cobre, considerando a estequiometria da reação, como determinado por Silva (2022, apud Moraes, 2011):



De acordo com o cálculo, 34 g de  $\text{H}_2\text{O}_2$  são necessários para 127 g de cobre, o que equivale a aproximadamente 6,69 g de  $\text{H}_2\text{O}_2$  para 25 g de cobre. Com base na densidade de 1,476 g/mL do  $\text{H}_2\text{O}_2$  a 30%, foram utilizados cerca de 4,5 mL do reagente. O peróxido de hidrogênio foi adicionado em alíquotas de 4,5 mL a cada 30 minutos, totalizando 54 mL ao longo de 6 horas de reação. Esses cálculos foram adaptados do trabalho de Silva (2022, apud Moraes 2011).

Mantendo a padronização proposta por Silva (2022, apud Moraes, 2011), a agitação foi mantida constante a 450 rpm para homogeneização, e a temperatura controlada entre 75°C e 85°C. Para análise, foram coletadas alíquotas de 5 mL da solução a cada 1,5 horas, totalizando quatro alíquotas para cada ensaio, totalizando ao final do processo 12 alíquotas.

### 3.6 Análise de Cobre Por Titulometria

As alíquotas coletadas durante o processo de lixiviação foram diluídas em água destilada na proporção de 1:100, passando pela preparação para análise de cobre por titulometria. O método utilizado emprega o EDTA como agente titulante, adequado para determinar a concentração de cobre presente nas amostras. A murexida foi utilizada como indicador visual para identificar o ponto final da titulação.

Figura 12 - Alíquotas diluídas



Fonte: Autoria própria (2024)

O procedimento foi iniciado com a transferência de 5 mL da alíquota diluída para um béquer, seguida da adição de 1 mL de ácido acético e uma pequena porção de aproximadamente 0,5 g de murexida como indicador. A mistura foi então aquecida até iniciar uma leve fervura, etapa necessária para melhorar a reatividade do sistema.

Após o aquecimento, iniciou-se a titulação, adicionando o EDTA em gotejamento lento e constante. Durante o processo, o béquer foi continuamente agitado para garantir a homogeneidade da solução e facilitar a interação entre o EDTA e os íons de cobre presentes, como pode ser observado na Figura 13 (lado esquerdo). O ponto final da titulação foi identificado pela mudança de cor da solução, indicando que todo o cobre havia reagido com o EDTA (Figura 13 – lado direito).

Figura 13 - Mudança de cor da solução após o ponto final.



Fonte: Autoria própria (2024)

O volume de EDTA consumido para cada alíquota foi registrado na Tabela 1. Este procedimento permitiu uma avaliação precisa da eficiência do processo de lixiviação na remoção de cobre das placas de circuito impresso.

Tabela 1 - Consumo de EDTA de cada alíquota na titulação

EXPERIMENTO		1° EDTA (mL)	2° EDTA (mL)	3° EDTA (mL)
Ácido sulfúrico (1 mol/L)	Coleta 1	1,4	1,5	0,5
	Coleta 2	8	2,2	1,0
	Coleta 3	14,8	6,4	6,2
	Coleta 4	18,3	10,6	11,2
Ácido sulfúrico (2 mol/L)	Coleta 1	1,2	1,5	0,5
	Coleta 2	4,4	3,5	1,5
	Coleta 3	10	7,2	3,2
	Coleta 4	15,2	13,3	7,2
Ácido sulfúrico (3 mol/L)	Coleta 1	0,6	0,4	0,9
	Coleta 2	0,9	1,7	1,1
	Coleta 3	5,7	1,9	1,4
	Coleta 4	8,4	6,2	3,8

Fonte: Autoria própria (2024)

Com esses resultados, foi possível determinar a concentração de extração de cobre obtido nas amostras a partir de uma curva de calibração. A curva de calibração é uma ferramenta essencial na análise quantitativa, permitindo, por exemplo, determinar a concentração de cobre nas amostras a partir de medidas experimentais, como no caso a titulometria.

Para construir a curva de calibração, foram preparadas soluções padrão de cobre em concentrações conhecidas e seus respectivos consumos de EDTA foram

medidos, conforme apresentado na Tabela 2.

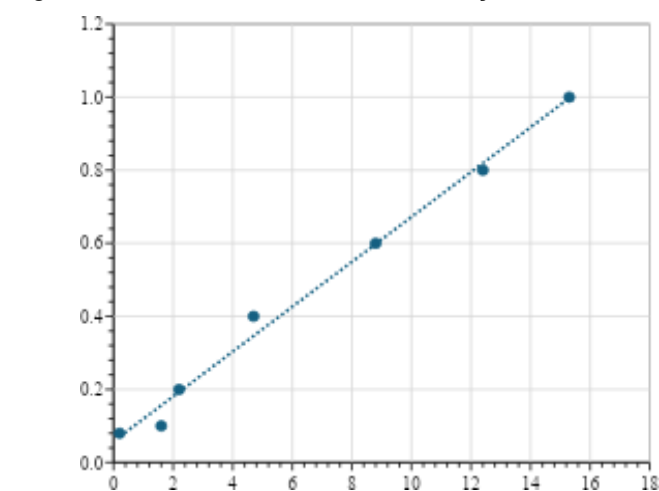
Tabela 2 - Curva de calibração

CONSUMO DE EDTA (mL)	CONCENTRAÇÃO DE COBRE (g/mL)
15,3	1
12,4	0,8
8,8	0,6
4,7	0,4
2,2	0,2
1,6	0,1
0,2	0,08

Fonte: Autoria própria (2024)

Os dados obtidos foram plotados no gráfico da Figura 14, onde a concentração das soluções (eixo x) foi correlacionada com as respostas instrumentais (eixo y).

Figura 14 - Gráfico da Curva de Calibração



Fonte: Autoria própria (2024)

Gerando uma equação de regressão linear da forma:

$$Y = 0,0614x + 0,0578$$

Onde:

- **y** representa a resposta instrumental,
- **x** representa a concentração do cobre dissolvido,
- **0,0614** é o coeficiente angular da reta,
- **0,0578** é o coeficiente linear.

A partir da equação da reta obtida, foi possível determinar a concentração de cobre nas amostras de concentração desconhecida, substituindo os valores de resposta obtidos experimentalmente.

### **3.7 Análise estatística dos dados**

Para avaliar a influência dos parâmetros operacionais na eficiência da extração de cobre, os dados obtidos nos ensaios de lixiviação foram submetidos a análise estatística. Utilizou-se a análise multivariada de variância (Two-way ANOVA) para verificar a significância da influência das variáveis independentes (tempo de reação e concentração de ácido sulfúrico) sobre a variável dependente (concentração de cobre extraído). Além disso, foi aplicada a análise de variância (ANOVA) para quantificar a contribuição de cada fator na variação total dos resultados. O nível de significância adotado foi de 5% ( $p < 0,05$ ), sendo considerados estatisticamente significativos os fatores cujo valor de  $p$  fosse inferior a esse limite. Os testes foram realizados utilizando o software Minitab, garantindo precisão na análise dos dados.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados da extração de cobre presente nas soluções de ácido sulfúrico, obtidas através do método de titulometria, em g/L, após 6 horas de reação estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados da extração de cobre

EXPERIMENTO		1º concentração Cu (g/L)	2º concentração Cu (g/L)	3º concentração Cu (g/L)
Ácido sulfúrico (1 mol/L)	Coleta 1	14,38	14,99	8,85
	Coleta 2	54,90	19,29	11,92
	Coleta 3	96,65	45,08	43,85
	Coleta 4	118,14	70,86	74,55
Ácido sulfúrico (2 mol/L)	Coleta 1	13,15	14,99	8,85
	Coleta 2	32,80	27,27	14,99
	Coleta 3	67,18	49,99	25,43
	Coleta 4	99,11	87,44	49,99
Ácido sulfúrico (3 mol/L)	Coleta 1	9,46	8,24	11,31
	Coleta 2	11,31	16,22	12,53
	Coleta 3	40,78	17,45	14,38
	Coleta 4	57,36	43,85	29,11

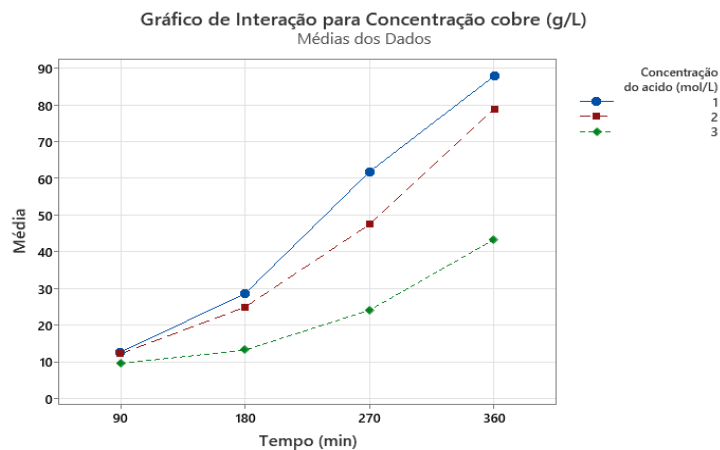
Fonte: Autoria própria (2024)

A análise desses resultados revela que a concentração de 1 mol/L de ácido sulfúrico obteve o melhor desempenho na remoção do cobre, com uma média de extração de 50,19 g/L e o seu valor máximo de 118,14 g/L. Esse valor se aproxima do que pode ser recuperado por meio da caracterização com água régia, que indica uma recuperação de 124,86 g de cobre para 795,29 g de placas, conforme indicado por Silva (2022).

A solução de 2 mol/L também demonstrou resultados satisfatórios, com uma extração média de 41,44 g/L. Em contrapartida, a solução de 3 mol/L apresentou menor eficiência, com médias e valores máximos inferiores, o que corrobora com os estudos que apontam que concentrações entre 1 e 2 mol/L de ácido sulfúrico são mais eficazes na extração do cobre (Cunha e Martins 2003).

A evolução da extração ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 15, confirma essa tendência. A solução de 1 mol/L manteve o melhor desempenho ao longo de toda a duração do experimento, atingindo uma concentração média de 90 g/L após 360 minutos. A solução de 2 mol/L apresentou uma progressão constante, alcançando aproximadamente 80 g/L no mesmo intervalo de tempo. Em contrapartida, a solução de 3 mol/L demonstrou uma extração inferior, com valores em torno de 50 g/L ao final do período analisado.

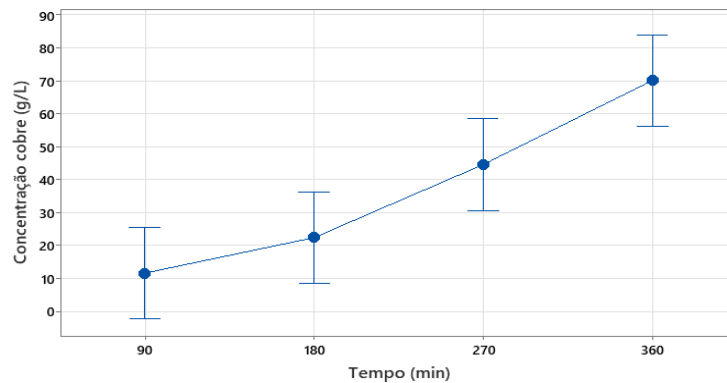
Figura 15 - Gráfico de interação para concentração de cobre (g/L)



Fonte: Autoria própria (2024)

A Figura 16 apresenta os intervalos de confiança para a média da concentração de cobre ao longo do tempo, mostrando que há um crescimento consistente na extração com o aumento do tempo de reação. A análise desses intervalos demonstra que a solução de 1 mol/L apresenta maior variabilidade mais e o que apresenta a maior eficiência na extração.

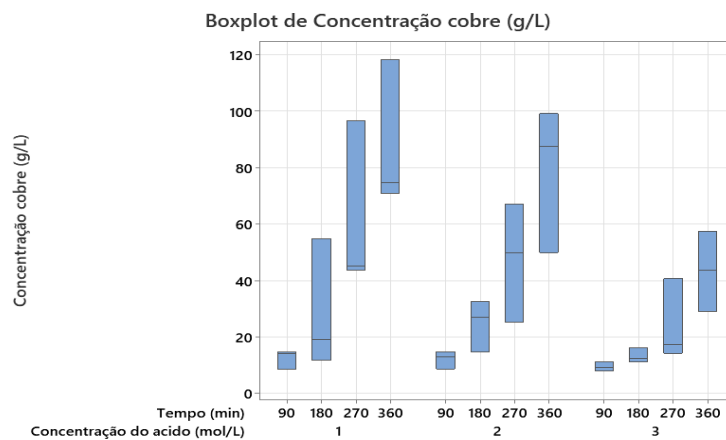
Figura 16 - Gráfico de concentração de cobre (g/L) comparado ao tempo (Min)  
Gráfico de Intervalos de Concentração cobre (g/L) versus Tempo (min)  
IC de 95% para a Média



Fonte: Autoria própria (2024)

Por fim, a Figura 17, por meio de *boxplots*, permite a visualização da dispersão dos dados e a distribuição das concentrações de cobre em diferentes tempos e concentrações de ácido. Nota-se uma maior variação nos tempos iniciais, estabilizando-se nos tempos finais para as concentrações de 1 e 2 mol/L.

Figura 17 - Gráfico de Variação de concentração de cobre na análise das alíquotas



Fonte: Autoria própria (2024)

Utilizou-se a análise de variância com dois fatores (Two-way ANOVA) para verificar a significância da influência das variáveis independentes (tempo de reação e concentração de ácido sulfúrico) sobre a variável dependente (concentração de cobre extraído). Além disso, essa análise permitiu quantificar a contribuição de cada fator na variação total dos resultados.

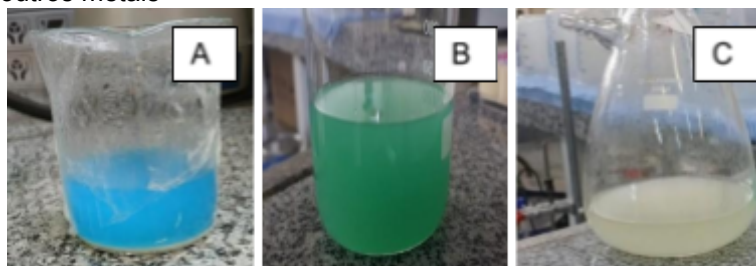
O nível de significância adotado foi de 5% ( $p < 0,05$ ), sendo considerados estatisticamente significativos os fatores cujo valor de "p" fosse inferior a esse limite.

Os testes foram realizados utilizando o software Minitab, garantindo

precisão na análise dos dados. A análise de variância (ANOVA) revelou que o fator tempo contribui com 66,97% da variação total, enquanto a concentração do ácido não apresentou impacto significativo, o que sugere que tempos de reação mais longos podem ser mais determinantes para a extração do que o aumento da concentração.

Esses resultados reforçam a hipótese de que concentrações mais elevadas de ácido sulfúrico podem não ser ideais para a extração de cobre, devido à possível interferência de outros metais presentes na matriz da placa de circuito impresso. Assim, conclui-se que concentrações entre 1 e 2 mol/L são mais eficazes para a extração do cobre, tanto em termos de média de extração quanto de valores máximos obtidos. Além disso, a eficiência no processo, a utilização de concentrações menores de reagente impacta diretamente o custo operacional, reduzindo o consumo de insumos químicos e minimizando gastos com aquisição, transporte e armazenamento do reagente. Dessa forma, a escolha dessas concentrações não apenas otimiza a recuperação do cobre, mas também torna o processo mais economicamente viável e sustentável. A menor eficiência observada na extração de cobre com maiores concentrações de ácido pode ser atribuída à presença de outros metais, tais como alumínio, ferro e zinco, que reagem com o ácido sulfúrico e estão presentes nas PCIs. Embora esses metais estejam em menores concentrações, eles podem interferir no processo de titulometria resultando na menor eficiência do processo. A suspeita dessa interferência pode ser corroborada pela coloração observada em algumas soluções, que, ao invés da coloração azul como mostra a figura "A" confirma a presença de íons de cobre, já as que apresentaram tons de cor verde figura "B" ou bege figura "C" indica a possível presença de outros metais na solução.

Figura 18 - Comparação de cor das soluções que indica uma possível extração de outros metais



Fonte: Autoria própria (2024)

## 5 CONCLUSÃO

A presente pesquisa demonstrou a viabilidade e relevância do uso de métodos hidrometalúrgicos para a recuperação de cobre a partir de placas de circuito impresso (PCIs) provenientes de resíduos eletrônicos, tema de grande importância diante da crescente geração de lixo eletrônico. O estudo investigou detalhadamente cada etapa do processo de lixiviação ácida, utilizando diferentes concentrações de ácido sulfúrico, e trouxe contribuições relevantes para a compreensão dessa técnica. Os resultados evidenciaram que a concentração de 1 mol/L de ácido sulfúrico apresentou o melhor desempenho na extração de cobre, alcançando uma taxa de recuperação superior às soluções de 2 mol/L e 3 mol/L. Além disso, foi constatado que tempos de reação mais longos desempenham um papel crucial na maximização da eficiência do processo, reforçando a necessidade de um controle criterioso das variáveis experimentais.

A análise estatística de variância com dois fatores, por meio da Two-way ANOVA e dos testes de ANOVA, demonstrou a influência significativa da concentração do ácido e do tempo de reação na eficiência da extração. Contudo, a variável tempo mostrou-se mais determinante, indicando que estender o tempo de reação pode ser uma estratégia mais eficaz do que aumentar a concentração do reagente. Outro ponto importante identificado foi a hipótese de interferência de outros metais presentes nas PCIs, como ferro e alumínio, que podem prejudicar a eficiência do processo de lixiviação e alterar a coloração das soluções. Essa observação destaca a necessidade de procedimentos complementares para purificar as amostras e otimizar a seletividade na extração.

Diante disso, conclui-se que a hidrometalurgia se apresenta como uma solução promissora para a reciclagem de resíduos eletrônicos, oferecendo uma alternativa sustentável e eficiente à pirometalurgia tradicional. Este método não apenas contribui para a conservação de recursos naturais, mas também ajuda a mitigar os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de equipamentos eletrônicos. Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar técnicas que aumentem a seletividade do processo de lixiviação, como avaliar a viabilidade econômica da aplicação em escala industrial. Parcerias entre instituições de pesquisa e empresas podem ser fundamentais para viabilizar a implementação

dessa tecnologia em larga escala, fomentando a economia circular e promovendo um desenvolvimento ambientalmente sustentável.

## REFERÊNCIAS

ABREU, H. F. G.; ABREU, C. L. M. Hidrometalurgia na reciclagem de resíduos metálicos. **Revista Brasileira de Ensino de Ciência e Tecnologia**, v. 7, n. 1, p. 24–35, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021**. São Paulo: ABRELPE, 2021.

BALDE, C. P. et al. **The Global E-waste Monitor 2020**. Bonn: United Nations University, 2020. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/>. Acesso em: 18 maio 2024.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.º 257, de 30 de junho de 1999. Dispõe sobre o gerenciamento de pilhas e baterias usadas. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 2 jul. 1999.

BRASIL. Lei n.º 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n.º 481, de 3 de outubro de 2017. Dispõe sobre diretrizes para o gerenciamento ambientalmente adequado de resíduos sólidos. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 4 out. 2017.

CELINSKI, T. M. et al. Perspectivas para reuso e reciclagem do lixo eletrônico. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br>. Acesso em: 7 jan. 2024.

CHIARADIA, L.; AMARAL, D.; DUARTE, L. Reciclagem de placas de circuito impresso: análise de métodos hidrometalúrgicos. **Revista Brasileira de Tecnologias Sustentáveis**, v. 13, n. 2, p. 112–120, 2021.

CUNHA, F. A.; MARTINS, A. H. Avaliação de alguns agentes lixiviantes para a remoção do cobre contido em um minério complexo de ouro. REM: **Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 3, p. 187–190, 2003.

FERREIRA, D. D. C.; SILVA, J. B.; GALDINO, J. C. D. S. Reciclagem de lixo eletrônico. **HOLOS**, v. 5, p. 105, 2011.

FUERSTENAU, M. C.; HAN, K. N. **Principles of Mineral Processing**. 1. ed. Colorado: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, 2003.

MAIOR PARTE DO LIXO eletrônico do Brasil é descartada irregularmente, mas poderia ser reciclada. **Jornal Nacional G1**, São Paulo, 9 dez. 2023.

GREEN ELETRON. **Desafios para a reciclagem do lixo eletrônico no Brasil**. Disponível em: <https://www.greeneletron.org.br/>. Acesso em: 15 maio 2024.

MATTOS, K. M. C.; JOSÉ, W.; PERALES, S. **Os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico e o uso da logística reversa para minimizar os efeitos causados ao meio ambiente.** [s. l.], 2008.

MONTES, T.; CELINSKI, V.; REZENDE, H. Perspectivas para reuso e reciclagem do lixo eletrônico. II Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 2011. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br>. Acesso em: 7 jan. 2024.

PANDA, R.; KUMARI, A.; JHA, M. K. Recovery of valuable metals from waste printed circuit boards using hydrometallurgical routes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 65, p. 1–12, 2013.

PEREIRA, M.; FERRAZ, T.; MASSAINI, R. **O mercado de reciclagem de resíduos eletrônicos no Brasil.** São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2014.

PORTILHO, F. Sustentabilidade ambiental, consumo e cidadania. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 3, n. 1, p. 1–18, 2005.

RECICLA SAMPA. **Brasil recicla apenas 3% do lixo eletrônico.** Disponível em: <https://www.reciclasampa.com.br/>. Acesso em: 10 maio 2025.

RITCEY, G. M. **Hidrometalurgia: princípios e aplicações.** Rio de Janeiro: CETEM, 2006.

SECRETARIA DA EDUCAÇÃO DO ESTADO DO CEARÁ. **Introdução à hidrometalurgia e seus processos.** Fortaleza: SEDUC, 2025.

SILVA, G. S. da. **Recuperação de cobre de placas de circuito impresso através do processo de lixiviação em ácido sulfúrico.** 2022. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

SOUSA, M. N. V. **Extração de metais das placas de circuito impresso: reciclagem do lixo eletrônico.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.