



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA ANALÍTICA E FÍSICO-QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA BACHARELADO

ANDREZA LOPES MOREIRA

**DETERMINAÇÃO DE METAIS DISPONIBILIZADOS POR LIXIVIAÇÕES ÁCIDAS
EM PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO**

FORTALEZA

2022

ANDREZA LOPES MOREIRA

DETERMINAÇÃO DE METAIS DISPONIBILIZADOS POR LIXIVIAÇÕES ÁCIDAS EM
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Química do Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Orientadora Pedagógica: Prof.^a Dr.^a. Maria das Graças Gomes.

Orientador Profissional: Dr. Ari Clecius Alves de Lima.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M836d Moreira, Andreza Lopes.
Determinação de metais disponibilizados por lixiviações ácidas em placas de circuito impresso / Andreza Lopes Moreira. – 2022.
37 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Curso de Química, Fortaleza, 2022.

Orientação: Profa. Dra. Maria das Graças Gomes.

1. Lixiviação ácida. 2. Placa de circuito impresso. 3. ICP OES. I. Título.

CDD 540

ANDREZA LOPES MOREIRA

DETERMINAÇÃO DE METAIS DISPONIBILIZADOS POR LIXIVIAÇÕES ÁCIDAS EM
PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Química do Departamento de Química Analítica e Físico-Química da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Química com Habilitação Industrial.

Aprovada em: __/__/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Maria das Graças Gomes (Orientadora Pedagógica)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Ari Clecius Alves de Lima (Orientador Profissional)
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Dr. Daniel de Castro Girão
Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC)

Aos meus pais, Ana e Civando.

AGRADECIMENTOS

Ao meus pais, Ana e Civando, por todo amor, dedicação e esforço, por sempre fazerem tudo pelos seus filhos, vocês são a minha força.

Aos meus irmãos, Anderson e Arthur, por sempre estarem do meu lado e por falar para todo mundo que eu sou a irmã inteligente.

A Prof^a. Dr^a. Maria das Graças Gomes, pela orientação dada, por todos os ensinamentos passados e por ser a inspiração de professora que pretendo ser um dia.

Ao Dr. Ari Clecius Alves de Lima, pela oportunidade de estágio e pela orientação para a realização deste trabalho.

A minha amiga/irmã, Carol Rouz, por acreditar em mim, mesmo quando eu não acreditava.

Ao Wefiton Rocha, por sempre me apoiar e incentivar a realização dos meus sonhos.

Aos meus amigos Alessandra, Beatriz e Wendell, por estarem sempre ao meu lado e por me fazerem sorrir até nos momentos mais desesperadores. Estamos apenas no começo.

Aos meus amigos de graduação Cláudio Brener, Gabriel Alencar e Maria Vitória, por sempre me ajudarem ao longo dessa jornada.

A Deus, por sempre estar ao meu lado.

“A verdadeira dificuldade não está em aceitar ideias novas, mas escapar das antigas.”

- John Maynard Keynes.

RESUMO

A disponibilidade de equipamentos eletroeletrônicos crescem proporcionalmente com o avanço tecnológico, tornando-os de fácil acesso, o que ocasionou uma ideologia de rápido descarte, produzindo uma crescente no acúmulo de resíduos e gerando um grande problema ambiental, visto que não se há uma política de reciclagem efetiva, nem locais de coletas popularizados para seu correto descarte. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivos a aplicação e estudo de lixiviações ácidas em placas de circuito impresso proveniente de equipamentos que se tornaram obsoletos, com o intuito de disponibilizar os metais presente em sua composição, visando um futuro processo de recuperação. Foram analisadas dois tipos de placas, uma proveniente de um notebook (TIPO 1) e outra de cinco celulares do mesmo modelo (TIPO 2), ambos os tipos foram submetidos a lixiviações com ácido clorídrico, ácido nítrico e água régia, durante um período de 24 horas. Os licores obtidos com as lixiviações foram caracterizados com auxílio da técnica espectrométrica de emissão ótica com plasma indutivamente acoplado, que se mostrou eficiente na identificação e quantização dos metais, revelando uma composição semelhante entre os dois tipos de placas, evidenciando que não é necessária uma segregação em uma aplicação em grande escala. Com relação aos lixiviantes utilizados, concluiu-se que o ácido clorídrico é um fraco agente lixiviante e que o ácido nítrico e a água régia mostram bom desempenho na disponibilização de metais como alumínio, cobre, níquel, estanho, zinco, entre outros. Entre os lixiviantes analisados, o ácido nítrico apresentou vantagem em relação aos demais, por sua alta eficiência na recuperação de cobre, que entre os metais analisados, é o principal metal de interesse á nível industrial, do qual disponibilizou-se 22,68 % (m/m) na placa de notebook e 25,78 % (m/m) nas placas de celulares.

Palavras-chave: Lixiviação ácida, placa de circuito impresso, ICP OES.

ABSTRACT

The availability of electrical and electronic equipment grows proportionately with technological advances, making them easily accessible, which has led to an ideology of rapid disposal, producing an increase in the accumulation of waste and generating a major environmental problem, since there is no policy of effective recycling, nor popular collection sites for their correct disposal. In this way, the present work had as objectives the application and study of acid leaching in printed circuit boards from equipment that became obsolete, in order to make available the metals present in its composition, aiming at a future recovery process. Two types of plates were analyzed, one from a notebook (TYPE 1) and another from five cell phones of the same model (TYPE 2), both types were subjected to leaching with hydrochloric acid, nitric acid and aqua regia, during a period of 24 hours. The liquors obtained from the leaching were characterized using the optical emission spectrometric technique with inductively coupled plasma, which proved to be efficient in the identification and quantization of metals, revealing a similar composition between the two types of plates, evidencing that segregation is not necessary. in a large-scale application. Regarding the leaching used, it was concluded that hydrochloric acid is a weak leaching agent and that nitric acid and aqua regia show good performance in the availability of metals such as aluminum, copper, nickel, tin, zinc, among others. Among the analyzed leachates, nitric acid showed an advantage over the others, due to its high efficiency in copper recovery, which among the analyzed metals, is the main metal of interest at the industrial level, of which 22.68% was available (m/m) on the notebook board and 25.78% (m/m) on the cell phone boards.

Keywords: Acid leaching, printed circuit board, ICP OES.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação das PCI de acordo com suas camadas de laminado e cobre	19
Figura 2 – Fluxograma das principais etapas envolvidas no processo hidrometalúrgico ..	21
Figura 3 – Diagrama de um espectrômetro de emissão ICP	22
Figura 4 – Tipos de amostras	23
Figura 5 – Fragmentação das placas	24
Figura 6 – Equipamento ICP OES	25
Figura 7 – Placas após os processos de lixiviações	28
Figura 8 – Observação da formação de dióxido de nitrogênio	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Composição de materiais em REEE	17
Tabela 2	– Composição média das placas de circuito impresso	19
Tabela 3	– Parâmetros utilizados na aplicação da técnica ICP OES	25
Tabela 4	– Grupos para realização da curva de calibração	26
Tabela 5	– Concentrações dos padrões utilizados na curva de calibração	26
Tabela 6	– LD e LQ para cada metal	26
Tabela 7	– Resultados das lixiviações com HCl	27
Tabela 8	– Potenciais padrões de redução	29
Tabela 9	– Resultados das lixiviações com HNO ₃	31
Tabela 10	– Resultados das lixiviações com água régia	33

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EEE	Equipamentos Eletroeletrônicos
REEE	Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos
PCI	Placa de Circuito Impresso
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente acoplado
Mt	Mega tonelada
Kg	Quilograma
ABINEE	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
HCl	Ácido Clorídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
3HCl:1HNO ₃	Água régia
LQ	Limite de quantificação
LD	Limite de detecção

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo Geral	15
2.2	Objetivos Específicos	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Lixo eletroeletrônico	16
3.1.1	<i>Composição do lixo eletroeletrônico</i>	17
3.2	Placa de Circuito Impresso (PCI)	18
3.3	Processos hidrometalúrgicos	20
3.4	Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES)	21
4	METODOLOGIA	23
4.1	Pré- tratamento da amostra	23
4.2	Lixiviações ácidas	24
4.3	Determinação dos metais	25
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
5.1	Análise das lixiviações com HCl	27
5.2	Análise das lixiviações com HNO₃	30
5.3	Análise das lixiviações com água régia	32
5.4	Eficiência dos lixiviantes na extração de metais de interesse	34
6	CONCLUSÃO	35
	REFERÊNCIAS	36

1 INTRODUÇÃO

O grande desenvolvimento da tecnologia proporcionou, por meio de equipamentos eletroeletrônicos (EEE), rápidos avanços na sociedade e na economia. A crescente e acelerada produção desses equipamentos tornou-os de fácil acesso, resultando na obsolescência dos mesmo e gerando um grande problema ambiental, o chamado lixo eletrônico, onde não há espaço apropriado para descarte e nem condições para a reciclagem de todo resíduo gerado (GERBASE e OLIVEIRA, 2012).

As placas de circuito impresso (PCIs), são um dos componentes presente na maioria dos eletrônicos, responsáveis por grande parte dos metais contidos nos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), podem conter metais como cobre, prata, ferro, alumínio, níquel, ouro, chumbo, zinco, entre diversos outros. A composição varia conforme os equipamentos e seus modelos (TUNCUK *et al.*, 2012).

A recuperação desses metais pode ser efetuada através de algumas técnicas, das quais são baseadas em processos físicos, hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos ou eletrometalúrgicos. As técnicas hidrometalúrgicas, podem ser realizadas através de lixiviações ácidas, capazes de promover a oxidação dos metais e disponibilizá-los em solução. Essa técnica apresenta vantagens por possuir custo comparativamente baixo, atingir até 98% de eficácia na recuperação dos metais e por causar menos danos ao meio ambiente, comparada com as técnicas pirometalúrgicos, das quais produzem grandes quantidades de gases tóxicos. (TUNCUK *et al.*, 2012).

Após sua disponibilização em solução, os metais podem ser determinados e quantizados por diversas técnicas, entre elas, a Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES), se destaca por ser uma ferramenta analítica multielementar e com baixo efeito matriz, possibilitando a análise de diversos tipos de amostra e em diversas concentrações, além de apresentar alta sensibilidade, precisão e baixos limites de detecção (COSTA, 2018).

O processo de recuperação ou reciclagem dos REEE, podem ser realizados de maneira simples e com poucas etapas, de modo a reduzir a poluição e utilizar menos energia que a produção primária. Além disso, as matérias primas provenientes dessa recuperação, contém em muitas das vezes, um grau de concentração e pureza superior a encontradas em minérios. Por exemplo, as PCIs contém cerca de 20% (m/m) de cobre, enquanto os minérios contém em torno de 1% (m/m) (VEIT, 2005). Assim, os estudos de quais agentes são mais eficientes na disponibilização dos metais, tornam-se de grande valia, visto que a utilização dos

reagentes adequado implica em uma maior porcentagem de recuperação.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Caracterizar os resíduos metálicos de placas de circuito impresso após submetidos a lixiviações ácidas.

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar, em placas de circuito impresso de notebook e celulares, lixiviações com ácido clorídrico (HCl), ácido nítrico (HNO₃) e água régia;
- Determinar as concentrações percentuais dos metais identificados por meio da técnica ICP-OES;
- Classificar o melhor lixivante, de acordo com sua eficiência na recuperação dos metais de interesse.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Lixo eletroeletrônico

O lixo eletroeletrônico, também conhecido como e-lixo ou REEE, pode ser considerado como todo resíduo proveniente de descartes de equipamentos eletrônicos como celulares, computadores, televisão, baterias, pilhas, rádios, eletrodomésticos, entre diversos outros (GERBASE e OLIVEIRA, 2012; SANTOS *et al.*, 2015).

O e-lixo vem se tornando um problema cada vez maior, com o desenvolvimento tecnológico, a sociedade obteve diversos benefícios. Entretanto isso ocasionou alguns efeitos indesejáveis, pois frequentemente transformam produtos duráveis e recém-lançados em obsoletos, gerando grandes quantidades de resíduos. Portanto, um grande problema ambiental, já que esses equipamentos muitas vezes são descartados em locais inadequados, chegando a causar danos à saúde humana e animal, pois eles podem conter vários compostos e elementos tóxicos (ROCHA *et al.*, 2010).

A contaminação com os resíduos eletroeletrônicos podem se dar de forma direta, com o manuseio de placas e seus componentes ou de forma indireta, como é o caso de aparelhos que são destinados a aterros sanitários, gerando o risco de contaminação dos solos e dos lençóis freáticos. Consequentemente afetam as águas, que são destinadas a diversas áreas, como a irrigação e o consumo humano (ROCHA *et al.*, 2010). De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE) (2021a), o descarte incorreto não é apenas um problema ambiental, mas também um desperdício de recursos, já que quando reciclados os REEE podem fornecer matéria-prima para diversos outros produtos e indústrias, evitando a extração dos limitados recursos naturais.

Segundo o relatório, *E-Waste Monitor 2020*, realizado pela Universidade das Nações Unidas, em 2019 foi gerado 53,6 Mt de lixo eletrônico no mundo, em média 7,3 Kg *per capita*, crescendo 9,2 Mt comparada ao ano de 2014. Estipulou-se que em 2030 este valor irá aumentar para 74,7 Mt, quase dobrando em 16 anos. Esta crescente é nutrida pela amplificação do uso de EEE com ciclos de vida curtos. O relatório da *Green Eletron*, realizado pela ABINEE (2021a), referente aos resíduos eletrônicos, apresenta que em 2019 o Brasil descartou mais de 2 milhões de toneladas de REEE, dos quais menos de 3% foram submetidos a reciclagem. No ranking dos países que mais geraram resíduos eletrônico em 2019, o Brasil aparece em quinto lugar com 2,1 milhões de toneladas, perdendo apenas para China (10,1 Mt), Estados Unidos (6,9 Mt), Índia (3,2 Mt) e Japão (2,5 Mt) (ABINEE, 2021b).

A regulamentação vigente que trata sobre o destino do lixo eletrônico no Brasil, é a Lei 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que dispõe as diretrizes do gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os resíduos eletrônicos, e as responsabilidades dos geradores e do poder público (BRASIL, 2010).

Em 2020 foi publicado o Decreto 10.240/2020 que estabelece a implantação do sistema de logística reversa para os produtos eletrônicos (BRASIL, 2020). Segundo o Governo, em 2020 havia 173 pontos de coletas de eletrônicos no Brasil, o decreto prevê que esse número aumentará para 5 mil pontos até 2025, favorecendo 400 municípios, nos quais deverão conter pelo menos um ponto de coleta a cada 25 mil habitantes (VILELA, 2020).

3.1.1 Composição do lixo eletroeletrônico

Os resíduos eletroeletrônicos são constituídos por uma variedade de componentes orgânicas e inorgânicas, que se alteram conforme o tipo, fabricante e idade do equipamento (TUNCUK *et al.*, 2012). Normalmente, os EEE são formados por unidades básicas que geralmente contém placas de circuitos impressos, cabos, disjuntores, equipamento de visualização (como telas), pilhas, baterias, plásticos antichamas, sensores, conectores, entre outros (ROCHA *et al.*, 2010). A Tabela 1, apresenta os materiais encontrados em REEE e suas respectivas porcentagens.

Tabela 1 – Composição de materiais em REEE

MATERIAL	QUANTIDADE (%)
Metais	
Ferro/Aço	47,9
Cobre	7,0
Alumínio	4,7
Não ferrosos	1,0
Total	60,6
Plásticos	
Plásticos Retardadores de Chamas	5,3
Plásticos Não Retardadores de Chamas	15,3
Total	20,6
Vidro	5,4
Madeira e compensado	2,6
Cerâmica	2,0
Placas de circuito impresso	3,1
Outros	5,7

Fonte: Adaptada de WINDER et al., 2005.

De forma genérica o e-lixo é composto, principalmente, de metais, plásticos, vidro e madeira. A maior porção da sucata eletroeletrônica é formada por metais, podendo chegar até cerca de 61% de sua composição, o que torna os REEE uma importante fonte de metais com alto potencial econômico, sendo o ferro, o metal que aparece em maior quantidade, seguido pelo cobre e alumínio. (TUNCUK *et al.*, 2012).

A problemática no descarte incorreto do lixo eletrônico é por ele conter essa grande quantidade de metais, dos quais muitos são tóxicos como chumbo, cádmio, mercúrio etc., também, podendo conter componentes orgânicos prejudiciais à saúde como polifenilas, poliésteres, policarbonatos, entre outros (SILVA, E., 2018).

Além dos metais comuns e metais tóxicos os EEE possuem metais preciosos, o que de acordo com Forti *et al.* (2020), torna o e-lixo uma ‘mina urbana’, já que quando reciclados esses metais podem ser usados como materiais secundários.

3.2 Placas de Circuito Impresso (PCI)

As placas de circuito impresso se revelam de grande importância para a indústria dos eletroeletrônicos, estando presente na maioria de seus equipamentos e desempenhando um valioso papel na composição dos computadores (GERBASE e OLIVEIRA, 2012). De acordo com Veit (2005), as PCIs são utilizadas em diversas áreas dessa indústria, sobretudo nas áreas de entretenimento e processamento de dados, podendo chegar a compor até 30% do peso de um equipamento. Sua composição é extremamente heterogênea, variando conforme o ano de fabricação e o tipo da placa.

De modo geral, elas contém em sua composição materiais orgânicos como papeis e plásticos, materiais cerâmicos constituídos especialmente de sílica e alumina, e por metais que podem chegar a mais de 20 tipos diferente (VENTURA, 2014). Cada placa pode conter uma quantidade de até 30% (m/m) de metais, dos quais podem ser divididos em metais preciosos (Ouro, prata, paládio e platina), metais base (Cobre, alumínio, níquel, estanho, zinco e ferro) e metais tóxicos (Mercúrio, berílio, chumbo, cádmio, arsênio, antimônio) (MORAES, 2010), sendo o cobre o metal mais abundante, podendo chegar cerca de 20% do peso de uma placa (TUNCUK *et al.*, 2012). A Tabela 2, destaca a média dos componentes encontrados nas placas de circuito impresso e suas respectivas porcentagens.

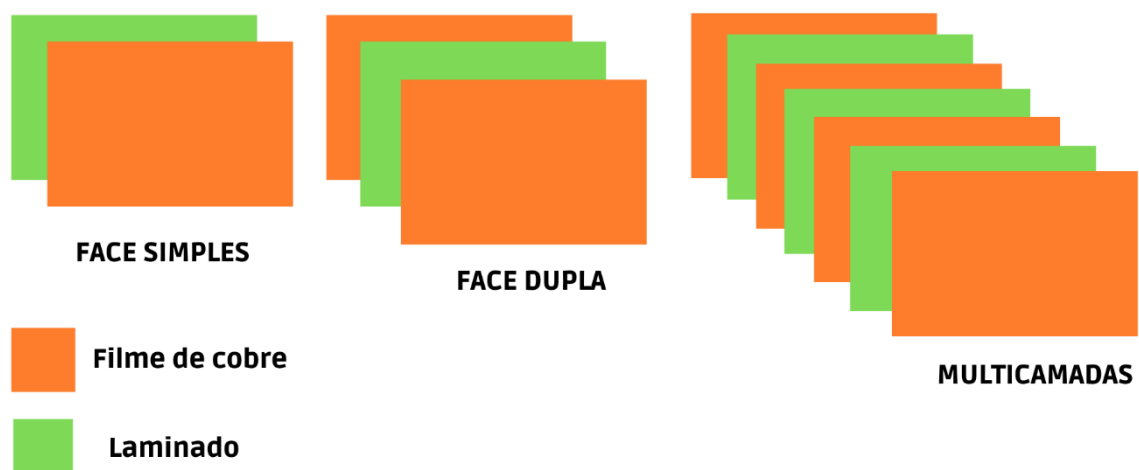
Tabela 2 – Composição média das placas de circuito impresso

Componentes de uma PCI	Quantidades médias
Metais	28%
Plásticos	19%
Mat. Cerâmicos, vidros e óxidos	49%
Bromo	4%

Fonte: Adaptada de GERBASE e OLIVEIRA, 2012.

As placas de circuito tem como base um material laminado, que pode apresentar diferentes composições, como resina fenólica, fibra de vidro e cerâmicas. O laminado é coberto por uma fina camada de cobre, onde serão montados os componentes restantes das placas (GERBASE e OLIVEIRA, 2012). Partindo desse pressuposto, as PCIs podem ser classificadas de acordo com a quantidade de camadas formadas por esses elementos (Ver Figura 1), como: a) Face simples, no qual apenas uma camada de uma placa é revestida por cobre; b) Face dupla, onde os dois lados de uma placa são revestidos por cobre; e c) Multicamadas, sendo está composta de 4 a 16 camadas, intercalando camadas de cobre e laminado (MORAES, 2010).

Figura 1 – Classificação das PCI de acordo com suas camadas de laminado e cobre



Fonte: MORAES, 2010.

As placas, ainda, podem ser classificadas de acordo com o seu tipo de laminado. Por exemplo, as placas que compõem os celulares são, geralmente, do tipo FR-4 (FR = *flame resistant*, ou seja, retardadores de chama) que são fabricadas com fibra de vidro e resina epóxi e apresentam multicamadas. Já as que compõem os computadores são do tipo FR-2, produzidas com celulose impregnadas com resinas fenólicas e do tipo CEM-1 formadas por materiais compostos de celulose, fibra de vidro e resina epóxi (MORAES, 2010).

Segundo Caldas (2017), uma das motivações para a reciclagem dessas placas é o desenvolvimento sustentável. Porém, a recuperação de metais preciosos como ouro e prata, e do cobre retém parte dos estudos, tornando as PCIs uma promissora matéria de reaproveitamento, da qual se dispõe de diversos processos para a obtenção dos componentes desejados. Dentre eles está a lixiviação ácida, uma técnica da hidrometalurgia, que será utilizado no presente trabalho.

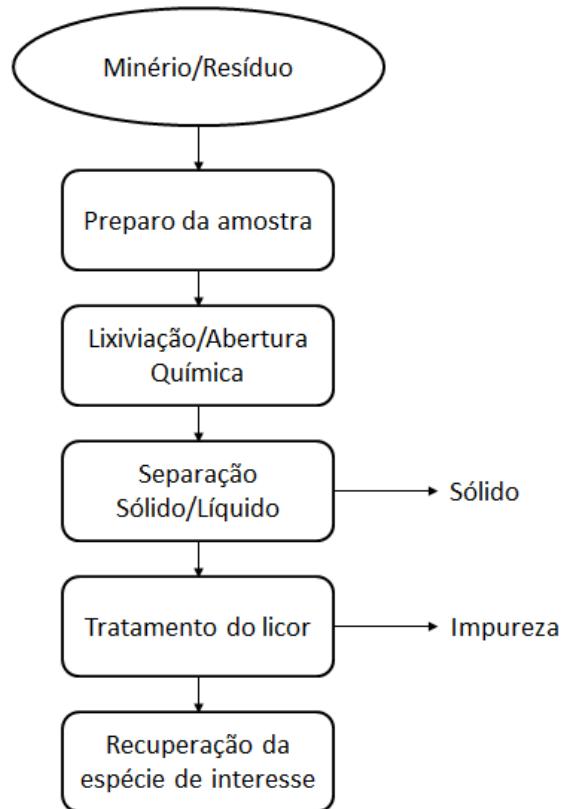
3.3 Processos hidrometalúrgicos

Os processos hidrometalúrgicos são constituídos por um conjunto de técnicas, das quais tem como finalidade obter espécies metálicas com elevado grau de pureza, na forma de metal ou de compostos metálicos. A extração, envolvendo essas técnicas, é caracterizada por ter como principal etapa a dissolução do mineral-minério em meio aquoso (SILVA, M., 2018).

A hidrometalurgia tem como vantagens seu baixo custo, baixo consumo de energia, fáceis processos de separação e causa menos danos ao meio ambiente quando comparada com os processos pirometalúrgicos. E como desvantagens, a necessidade de um pré-tratamento da amostra, pois a técnica só é eficiente se o metal estiver exposto, a necessidade de grandes volumes de reagentes e a formação de efluentes corrosivos e/ou tóxicos (VEIT, 2005).

Para a aplicação desse processo em placas de circuito impresso, o pré-tratamento da amostra, destacado como preparo da amostra, no fluxograma da Figura 2, é de extrema importância pois os elementos metálicos são frequentemente cobertos ou encapsulado por vários materiais cerâmicos ou plásticos. Essa técnica é realizada através do desmanche dos componentes da placa e por sua fragmentação, com a finalidade de expor os metais a ação dos reagentes lixiviantes (TUNCUK *et al.*, 2012).

Figura 2 – Fluxograma das principais etapas envolvidas no processo hidrometalúrgico



Fonte: SILVA, M., 2018.

A lixiviação promove a dissolução dos metais presente nos minérios ou sucatas eletrônicas através do uso de reagentes ácidos, alcalinos ou salinos (MORAES, 2011). Essa técnica normalmente necessita da utilização de agentes oxidantes para a eficiência na recuperação dos metais preciosos, sendo alvo de estudos, pois a busca por lixiviantes eficientes e com baixa toxicidade se tornou necessária visto que o agente lixivante mais empregado para a recuperação de metais preciosos em minérios era o cianeto, um componente altamente tóxico (PETTER, 2012).

As demais técnicas aplicada na hidrometalurgia são: extração por solventes (Líquido-Líquido), troca iônica, cementação, adsorção e precipitação química (SILVA, M., 2018).

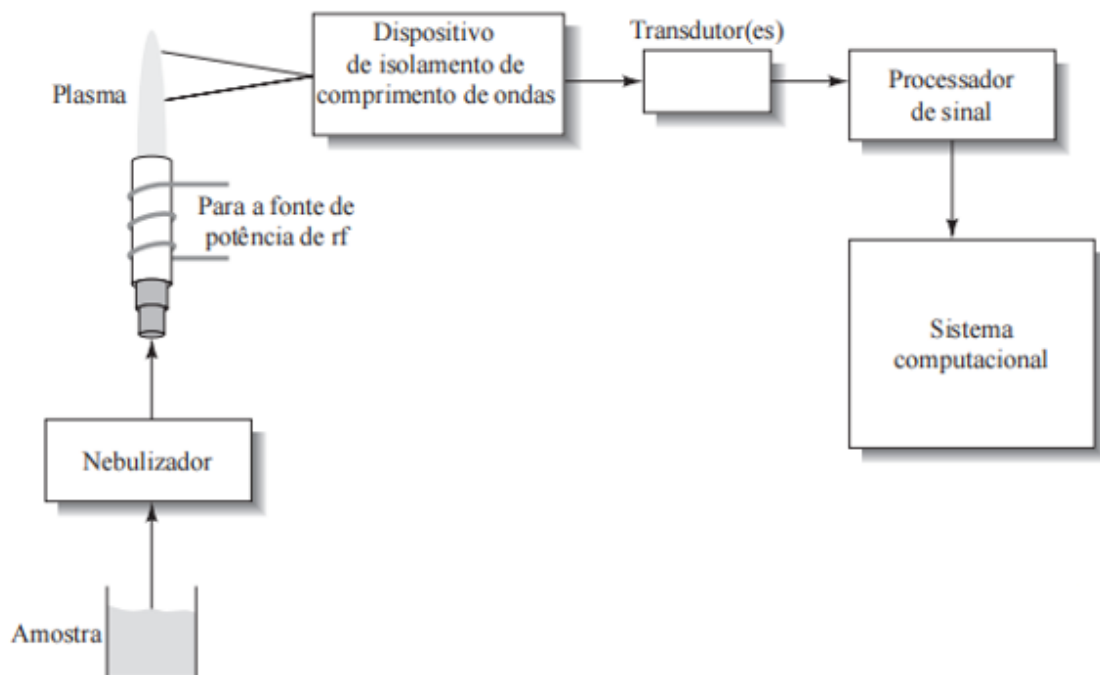
3.4 Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP OES)

O ICP OES é uma técnica analítica baseada na medida da radiação emitida nas regiões do visível e ultravioleta, quando átomos neutros e átomos ionizados voltam ao estado fundamental. É vastamente empregada na análise de traços de metais, por sua capacidade de

atuar em diversas matrizes, por apresentar alta estabilidade, baixo ruído e poucos interferentes. Além de ser uma técnica multielementar, capaz de realizar a determinação simultânea de vários metais (SKOOG *et al*, 2006; VOGEL *et al*, 2002).

O sistema de operação do ICP-OES (Ver Figura 3), se inicia com a introdução da amostra, geralmente líquida, através de um nebulizador que a transforma em uma nuvem de gotículas chamada aerossol. Na fonte de plasma, um gás inerte, normalmente o argônio, se ioniza em um campo elétrico forte por radiofrequência, produzindo um plasma que tem como função atomizar os elementos da amostra. O dispositivo de isolamento de comprimentos de ondas emitidos, pode ser constituído de um monocromador que isola apenas um comprimento de onda por vez em uma fenda de saída, de um policromador que isola simultaneamente vários comprimentos de onda em múltiplas fendas de saída ou de um espectrógrafo que permite a saída de uma faixa de comprimentos de ondas. O detector, normalmente composto de fotomultiplicadores, converte a radiação isolada em sinal elétrico, que são processados e fornecidos para um sistema computacional, que dispõe de programas que auxiliam na seleção dos comprimentos de ondas, na calibração, na produção de gráficos e relatórios, entre outras funções (SKOOG *et al*, 2006).

Figura 3 – Diagrama de um espectrômetro típico de emissão de ICP

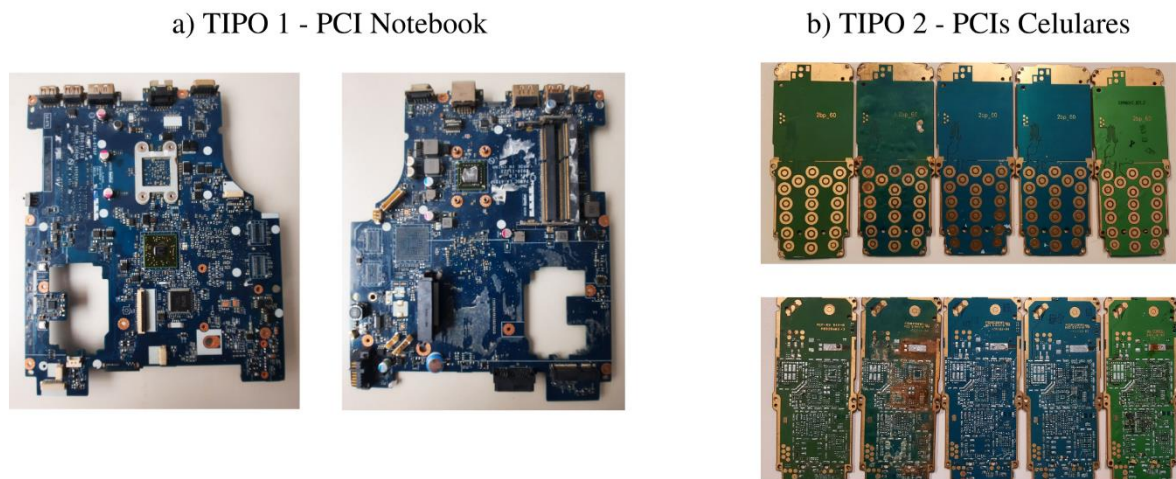


4 METODOLOGIA

Os ensaios hidrometalúrgicos, do presente trabalho, foram realizados no Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE) e as análises dos metais pela técnica ICP OES foram realizadas no Laboratório de Química Instrumental (LQI), ambos do Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC).

Foram utilizados dois tipos de amostras, denominadas TIPO 1 e TIPO 2, onde a amostra TIPO 1 é uma placa de circuito impresso proveniente de uma placa mãe de um notebook com identificação PAWGC LA-6755P, e a amostra TIPO 2 são cinco placas de circuito impresso de celulares do mesmo modelo sem identificações (Ver Figura 4), provenientes de equipamentos em desuso descartados.

Figura 4 – Tipos de amostras



Fonte: Elaborada pela autora.

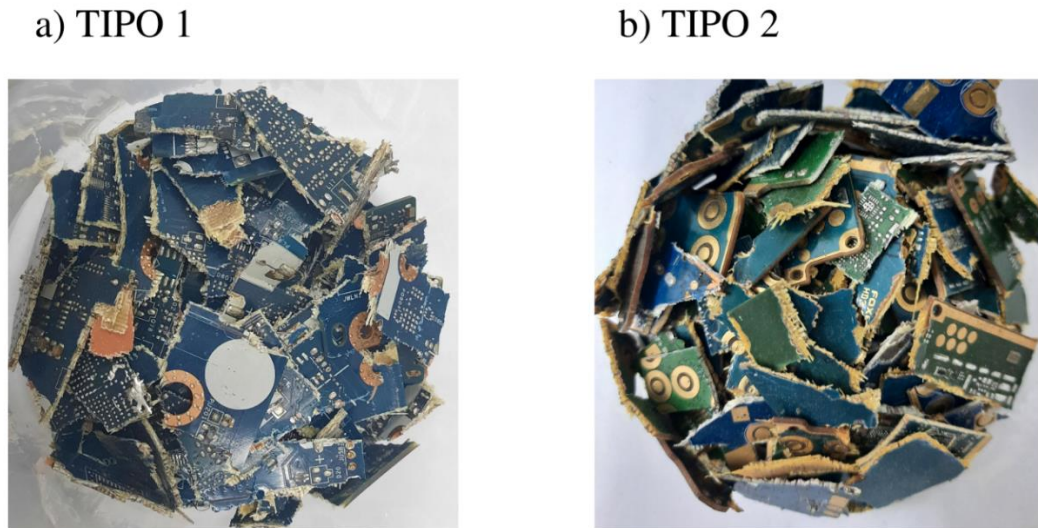
4.1 Pré- tratamento da amostra

Com a finalidade de maior exposição dos metais, à ação dos agentes lixiviantes, a placa TIPO 1, passou por um processo manual de limpeza, onde com o auxílio de alicates, soprador térmico e chave de fenda, foram removidas as partes integradas, como capacitores, baterias, conectores, componentes plásticos e cerâmicos. As placas do TIPO 2, foram fornecidas sem qualquer componente integrado.

Em seguida, os dois tipos de amostras, passaram por um processo de desmanche, na qual com o auxílio de tesouras e alicates, as placas foram cortadas em frações menores (Ver

Figura 5), para facilitar o manuseio na realização dos ensaios. As placas provenientes dos cinco celulares (TIPO 2), foram misturadas para fornecer a quantidade de amostra necessária.

Figura 5 – Fragmentação das placas



Fonte: Elaborada pela autora.

4.2 Lixiviações ácidas

O processamento hidrometalúrgico da lixiviação ácida, foi realizado utilizando HCl, HNO₃ (ambos padrões analíticos), e uma solução de água régia, preparada com os respectivos ácidos, com relação de 3HCl : 1HNO₃.

Os dois tipos de amostra foram submetidas à ação dos ácidos, na proporção de 5g de resíduo para 100mL de reagente. As digestões ocorreram em temperatura ambiente (~27 °C), durante 24h. Os ensaios foram realizados em duplicata para maior confiabilidade dos resultados obtidos.

Após esse período, os resíduos sólidos foram separados do licor lixiviado através de filtração simples utilizando papel de filtro quantitativo, e as massas dos resíduos foram pesadas em uma balança analítica.

Os licores obtidos nas lixiviações foram diluídos com um fator de diluição de 200 vezes, devido a grande quantidade de metais e a acidez da solução, na qual com o auxílio de uma micropipeta retirou-se 0,5mL de licor, transferindo-o para um balão de 100mL e realizou-se sua aferição. As soluções diluídas foram encaminhadas para análise em ICP OES.

4.3 Determinação dos metais

A caracterização dos metais disponibilizados pelas lixiviações ácidas, foram realizadas no equipamento *iCAP 6000 SERIES, ICP Spectrometer* da marca *Thermo Scientific* (Ver figura 6), conforme a metodologia descrita no POT 76 – LQI/LEA – Determinações de metais por ICP OES, do LQI, os parâmetros utilizados estão apresentados na Tabela 3.

Figura 6 – Equipamento ICP OES



Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 3 – Parâmetros utilizados na aplicação da técnica ICP OES

Parâmetros	Condições
Replicatas	03
Introdução da amostra	Nebulizador
Visão do plasma	Axial
Modo de análise	Speed
Tempo de descarga da amostra	15 s
Modo de calibração	Externa
Potência RF	1150 W
Fluxo auxiliar de gás	0,5 L/min
Fluxo de gás nebulizador	0,45 L/min
Fluxo de gás refrigerante	12 L/min

Fonte: Elaborada pela autora.

Após ligar o equipamento, aguardou-se 30 minutos para a estabilização do plasma e realizou-se as leituras das curvas de calibrações, brancos e amostras.

A técnica aplicada possibilita a determinação simultânea de 28 elementos, onde a curva de calibração multielementar em mg/L, é realizada dividindo-se os padrões de metais em dois grupos, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 – Grupos para realização das curvas de calibração

Grupos	Padrões de metais
I	Ba, Be, Cd, Cr, Co, Mn, Mo, Ni, Pb, Sb, Sc, Se, Sr, V
II	Al, As, B, Bi, Ca, Cu, Fe, K, Li, Mg, Na, P, Sn, Zn

Fonte: Elaborada pela autora.

A curva utiliza 7 pontos: P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, com concentrações variando de 0,010 mg/L a 8,0 mg/L (Ver Tabela 5), preparadas a partir de soluções estoque de 25 mg/L. Com critério de aceitação de coeficiente linear de 0,99. Os limites de detecção (LD) e quantificação (LQ), estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 5 – Concentrações dos padrões utilizados na curva de calibração

Grupos	Concentrações (mg/L)						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
I	0,01	0,05	0,10	0,25	0,5	1,0	2,0
II	0,10	0,25	0,50	1,0	2,0	4,0	8,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6 – LD e LQ para cada metal

Elemento	LD (mg/Kg)	LQ (mg/Kg)
Al (Alumínio)	0,005	0,05
As (Arsênio)	0,001	0,01
B (Boro)	0,03	0,1
Ba (Bário)	0,0005	0,005
Be (Berílio)	0,0005	0,005
Bi (Bismuto)	0,002	0,01
Ca (Cálcio)	0,005	0,1
Cd (Cádmio)	0,0005	0,001
Co (Cobalto)	0,0005	0,005
Cr (Cromo)	0,0005	0,01
Cu (Cobre)	0,0005	0,05
Fe (Ferro)	0,005	0,1
K (Potássio)	0,005	0,1
Li (Lítio)	0,005	0,1
Mg (Magnésio)	0,001	0,1
Mn (Manganês)	0,0005	0,005
Mo (Molibdênio)	0,0005	0,005
Na (Sódio)	0,01	0,1
Ni (Níquel)	0,0005	0,01
P (fósforo)	0,01	0,03
Pb (Chumbo)	0,001	0,01
Sb (Antimônio)	0,002	0,005
Sc (Escândio)	0,0005	0,01
Se (Selênio)	0,002	0,002
Sn (Estanho)	0,001	0,001
Sr (Estrôncio)	0,001	0,001
V (Vanádio)	0,0005	0,0005
Zn (Zinco)	0,001	0,001

Fonte: Elaborada pela autora.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Análise das lixiviações com HCl

Os resultados das caracterizações dos metais disponibilizados nas lixiviações com HCl obtidos pelo ICP OES em mg/L, as porcentagens (m/m) de recuperação dos metais e seus desvios padrões, estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Resultados das lixiviações com HCl

METAL	HCl					
	TIPO 1			TIPO 2		
	mg/L	% (m/m)	σ	mg/L	% (m/m)	σ
Al	2,6	0,005	0,002	44,1	0,086	0,005
B	1,23	0,002	0,000	2,69	0,005	0,001
Ba	24,62	0,049	0,003	5,62	0,011	0,001
Be	< LQ	-	-	0,14	0,0002	0,000
Ca	< LQ	-	-	< LQ	-	-
Cd	< LQ	-	-	0,29	0,0004	0,0000
Co	0,32	0,001	0,001	0,50	0,001	0,0000
Cu	806,4	1,605	0,506	493,1	0,957	0,014
Fe	79,91	0,159	0,126	< LQ	-	-
K	5,5	0,011	0,008	8,72	0,017	0,002
Mg	0,63	0,002	0,006	1,61	0,003	0,001
Mn	0,49	0,001	0,001	2,27	0,004	0,004
Mo	< LQ	-	-	0,17	0,0003	0,000
Na	8,87	0,018	0,063	< LQ	-	-
Ni	55,68	0,111	0,043	8,71	0,017	0,003
P	< LQ	-	-	< LQ	-	-
Pb	1,42	0,003	0,002	9,77	0,019	0,009
Sc	< LQ	-	-	0,41	0,0008	0,000
Se	0,05	0,0001	0,001	< LQ	-	-
Sn	497,1	0,989	0,458	14,26	0,028	0,014
Sr	0,12	0,0002	0,000	3,02	0,006	0,002
Zn	38,18	0,076	0,025	25,79	0,050	0,0004

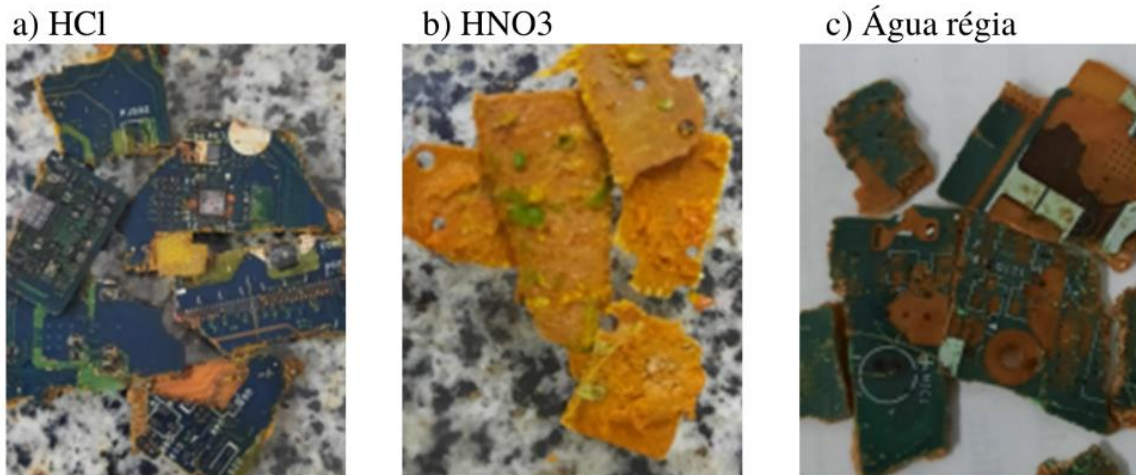
Fonte: Elaborada pela autora.

Nas Lixiviações com o HCl, a placa do TIPO 1, apresentou maiores concentrações de Cu, Sn e Fe, enquanto as placas do TIPO 2 de Cu, Al e Zn. A presença desses metais, já era esperada de maneira significativa, por se tratar de metais comumente utilizados em todos os tipos de placas, porém em proporções distintas, visto que suas porcentagens variam conforme

o tipo de placa, a finalidade e o ano de fabricação.

Ademais, o ácido clorídrico não é um ácido oxidante forte, desta forma ele é capaz de remover apenas os metais presente nas superfícies das placas, o que justifica os baixos valores obtidos, quando comparados com os das outras soluções ácidas utilizadas no presente trabalho. O estado das placas após as lixiviações (Ver Figura 7), demonstra a capacidade corrosiva dos ácidos. Onde as placas que foram submetidas à ação do HCl continuaram com a mesma aparência de antes do processo, sendo possível visualizar vestígios de metais. As com HNO₃ sofreram uma corrosão severa, adquirindo um aspecto diferente do inicial e as com água régia observou-se uma corrosão menor que a do ácido nítrico, porém não sendo visível nenhum vestígio de metais nas placas.

Figura 7 – Placas após os processos de lixiviação



Fonte: Elaborada pela autora.

A disponibilização desses metais em solução ocorre através de reações de oxirredução, onde os metais passam por um processo de oxidação, saindo de sua forma metálica e assumindo uma forma iônica em meio aquoso, conforme a equação 1:



Para que esse processo ocorra de forma espontânea, é necessário a presença de um agente oxidante com potencial de redução suficiente para permitir a oxidação do metal. Sabendo que, reações espontâneas apresentam $\Delta G^\circ < 0$, e relacionando as equações (2) e (3) é possível estima-se a espontaneidade de uma reação pelo potencial padrão da célula.

$$\Delta G^\circ = -n.F.\Delta E^\circ \quad (2)$$

$$\Delta E^\circ = E^\circ_{\text{redução}} - E^\circ_{\text{oxidação}} \quad (3)$$

Onde:

ΔG° = Energia livre de Gibbs;

$n = n^\circ$ de mols;

F = constante de Faraday ;

ΔE° = Potencial padrão da célula ;

$E^\circ_{\text{redução}}$ = Potencial padrão de redução da espécie que se reduz;

$E^\circ_{\text{oxidação}}$ = Potencial padrão de redução da espécie que se oxida.

Deste modo, quando o ΔE° for positivo, a reação ocorre espontaneamente e quando for negativo, a reação não ocorre de forma espontânea. A Tabela 8, apresenta os potenciais padrões de redução de alguns metais presente nas PCIs.

Tabela 8 – Potenciais padrões de redução

Reações	E° (V)
$K^+ + e \rightleftharpoons K_{(s)}$	-2,936
$Ba^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ba_{(s)}$	-2,906
$Sr^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sr_{(s)}$	-2,889
$Ca^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ca_{(s)}$	-2,868
$Na^+ + e \rightleftharpoons Na_{(s)}$	-2,714
$Mg^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mg_{(s)}$	-2,36
$Be^{2+} + 2e \rightleftharpoons Be_{(s)}$	-1,968
$Al^{3+} + 3e \rightleftharpoons Al_{(s)}$	-1,677
$Mn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Mn_{(s)}$	-1,182
$Zn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Zn_{(s)}$	-0,762
$Fe^{2+} + 2e \rightleftharpoons Fe_{(s)}$	-0,44
$Cd^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cd_{(s)}$	-0,402
$Co^{2+} + 2e \rightleftharpoons Co_{(s)}$	-0,282
$Ni^{2+} + 2e \rightleftharpoons Ni_{(s)}$	-0,236
$Sn^{2+} + 2e \rightleftharpoons Sn_{(s)}$	-0,141
$Pb^{2+} + 2e \rightleftharpoons Pb_{(s)}$	-0,126
$2H^+ + 2e \rightleftharpoons H_{2(g)}$	0,00
$Cu^{2+} + 2e \rightleftharpoons Cu_{(s)}$	0,339
$NO_3^- + 4H^+ + 3e \rightleftharpoons NO_{(g)} + 2H_2O$	0,955

Fonte: Adaptada de HARRIS, 2012.

O ácido clorídrico tem como espécie oxidante o íon H^+ , que por possuir potencial padrão de redução igual a 0,0 V, é capaz de oxidar espontaneamente metais que apresentem

potenciais de redução negativos. As equações de (4) a (6), exemplificam como ocorrem essas reações.



O cobre apresenta potencial padrão igual à 0,339V, deste modo, a sua reação com o H^+ não ocorre de maneira espontânea. Porém, graças a grande quantidade de espécies presente em solução e aos componentes orgânicos presente nas placas, ocorre um aumento no potencial, tornando possível uma pequena disponibilização de cobre (Equação 7). Devido a elevada concentração de cobre encontrada nas PCIs, mesmo uma pequena disponibilização, ocasiona um valor superior a qualquer outro metal.



O cloreto (Cl^-) proveniente do ácido, forma com os cátions metálicos seus sais solúveis ou complexos, pois o excesso de cloreto presente na solução, pode reagir com os metais de transição até a formação de complexos, conforme exemplificam as equações (8) e (9):



5.2 Análise das lixiviações com HNO_3

Os resultados das caracterizações dos metais disponibilizados nas lixiviações com HNO_3 obtidos pelo ICP OES em mg/L, as porcentagens (m/m) de recuperação dos metais e seus desvios padrões, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados das lixiviações com HNO₃

METAL	HNO ₃					
	TIPO 1			TIPO 2		
	mg/L	% (m/m)	σ	mg/L	% (m/m)	σ
Al	13,13	0,025	0,011	203,0	0,401	0,084
B	3,75	0,007	0,002	1,20	0,002	0,000
Ba	157,26	0,305	0,051	47,49	0,094	0,006
Be	< LQ	-	-	0,37	0,001	0,000
Ca	< LQ	-	-	185,9	0,367	0,331
Cd	0,03	0,0003	0,0002	6,09	0,012	0,0120
Co	0,01	0,0002	0,0000	0,12	0,0002	0,0000
Cu	11689	22,68	0,490	13054	25,78	0,640
Fe	6,15	0,012	0,012	64,62	0,128	0,062
K	37,76	0,073	0,041	21,16	0,042	0,021
Mg	< LQ	-	-	< LQ	-	-
Mn	4,79	0,009	0,004	5,66	0,011	0,004
Mo	< LQ	-	-	0,14	0,0002	0,000
Na	< LQ	-	-	< LQ	-	-
Ni	124,3	0,241	0,052	170,1	0,336	0,045
P	< LQ	-	-	16,76	0,033	0,003
Pb	46,22	0,089	0,004	22,08	0,044	0,009
Sc	0,45	0,0009	0,000	< LQ	-	-
Se	0,8	0,002	0,001	< LQ	-	-
Sn	161,1	0,313	0,133	178,5	0,352	0,178
Sr	1,07	0,002	0,001	2,07	0,004	0,001
Zn	38,18	0,074	0,019	13,44	0,027	0,029

Fonte: Elaborada pela autora.

Nas Lixiviações com o HNO₃, a placa TIPO 1, apresentou maiores concentrações de Cu, Sn e Ba, enquanto as TIPO 2 de Cu, Al, Ca e Sn. O ácido nítrico é considerado um ácido oxidante forte, deste modo, ele causou uma maior corrosão nas placas, atingindo camadas mais internas e disponibilizando maiores concentrações.

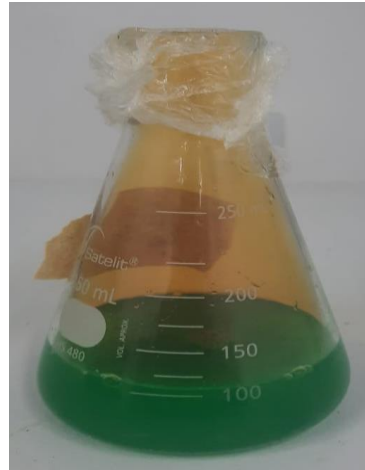
A presença da grande quantidade de Ba na placa TIPO 1, indica que a placa de notebook é composta por um laminado do tipo FR-2, sendo constituído de alguma resina que contém bário em sua composição. Já a grande quantidade de Ca nas placas TIPO 2, indica que seu material laminado é do tipo FR-4, ou seja, de fibra de vidro.

O agente oxidante do HNO₃ é o ânion nitrato (NO₃⁻), que apresenta potencial padrão de redução igual a 0,955 V, deste modo ele é capaz de oxidar espontaneamente todos os metais contidos na análise realizada no presente trabalho. A redução do íon nitrato leva a formação do monóxido de nitrogênio e água, conforme é possível visualizar na equação (10).



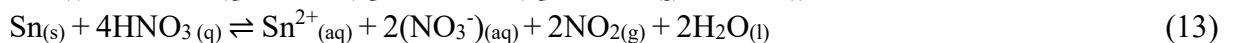
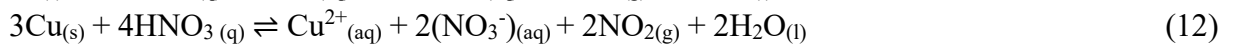
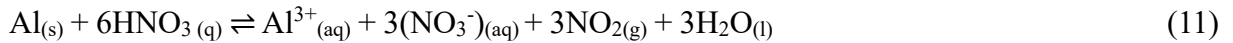
Porém durante os ensaios com o ácido nítrico, observou-se a formação de um gás castanho (Ver Figura 8), o que demonstras que o monóxido se oxidou, formando dióxido de nitrogênio. Para uma aplicação em grande escala, esse gás pode ser encaminhando para um sistema que possibilite sua solubilização em água, evitando a liberação no ambiente .

Figura 8 – Observação da formação de dióxido de nitrogênio



Fonte: Elaborada pela autora.

Deste modo as prováveis reações dos metais com o ácido estão exemplificadas nas equações (11), (12) e (13).



Além do forte poder oxidativo do ácido nítrico, as disponibilizações dos metais se tornam eficientes devido a característica do nitrato de formar sais solúveis com todos os metais, assim mantendo os íons em solução.

5.3 Análise das lixiviações com água régia

Os resultados das caracterizações dos metais disponibilizados nas lixiviações com água régia obtidos pelo ICP OES em mg/L, as porcentagens (m/m) de recuperação dos metais e seus desvios padrões, estão apresentados na Tabela 10.

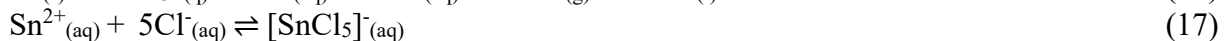
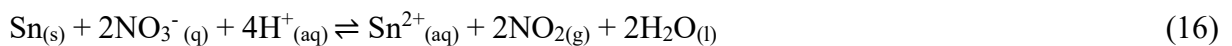
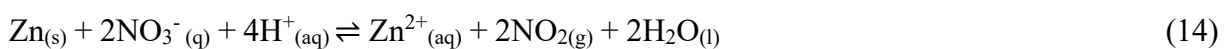
Tabela 10 – Resultados das lixiviações com água régia

METAL	ÁGUA RÉGIA					
	TIPO 1			TIPO 2		
	mg/L	% (m/m)	σ	mg/L	% (m/m)	σ
Al	11,29	0,022	0,011	140,73	0,274	0,078
B	7,78	0,015	0,011	3,32	0,001	0,001
Ba	146,7	0,283	0,335	12,25	0,026	0,002
Be	0,19	0,0004	0,000	0,36	0,001	0,000
Ca	20,33	0,039	0,082	193,4	0,377	0,209
Cd	0,11	0,0002	0,0001	0,30	0,001	0,000
Co	0,15	0,0003	0,0003	0,18	0,0003	0,000
Cu	10529	20,33	2,750	12463	24,279	0,450
Fe	107,0	0,207	0,202	19,02	0,037	0,036
K	< LQ	-	-	11,90	0,023	0,010
Mg	< LQ	-	-	< LQ	-	-
Mn	0,53	0,001	0,000	3,05	0,006	0,003
Mo	< LQ	-	-	0,09	0,0001	0,000
Na	< LQ	-	-	< LQ	-	-
Ni	103,6	0,20	0,248	278,7	0,542	0,047
P	< LQ	-	-	< LQ	-	0,051
Pb	9,32	0,018	0,003	32,98	0,064	0,033
Sc	0,11	0,0002	0,000	< LQ	-	-
Se	< LQ	-	-	< LQ	-	-
Sn	1790	3,456	1,803	866,1	1,687	0,268
Sr	1,09	0,002	0,004	5,15	0,010	0,006
Zn	21,50	0,041	0,062	50,44	0,098	0,003

Fonte: Elaborada pela autora.

Nas Lixiviações com água régia, a placa TIPO 1, apresentou maiores concentrações de Cu, Sn e Ba, enquanto as TIPO 2 de Cu, Al, Sn e Ca. Assim como o ácido nítrico, a água régia causou uma maior corrosão na placa, permitindo a extração de metais de camadas mais internas, apresentando os mesmos compostos com maior índice de extração, e em concentrações semelhantes. Exceto pelo Sn, que apresentou uma quantidade significativamente maior, pois na placa TIPO 1, ele passou de 116,1 mg/L para 1790 mg/L, e na TIPO 2, de 178,5 mg/L para 866,1 mg/L, o que é possivelmente influência da formação do seu complexo com cloro na solução régia.

A água régia apresenta forte poder oxidante devido a presença do ácido nítrico, além de ser capaz de formar complexos com os metais de transição, devido ao excesso de cloreto proveniente do ácido clorídrico. As reações de oxidação e complexação, ocorrem conforme exemplificam as equações (14) a (17).



5.4 Eficiência dos lixivantes na extração de metais de interesse

De modo geral, os dois tipos de placas apresentaram composição semelhantes, divergindo na presença de alguns metais que frequentemente não se há interesse em recuperar. Dentre os metais determinados, os que apresentam maior relevância na reciclagem das PCIs, devido seus valores e/ou por sua baixa composição em minérios, são: cobre, alumínio, níquel, estanho e zinco. O quadro 1, mostra as porcentagens de extração desses metais em seus respectivos meios.

Quadro 1 – Porcentagem de extração dos metais de interesse

		% (m/m)				
		Al	Cu	Ni	Sn	Zn
HCl	TIPO 1	0,005	1,605	0,111	0,989	0,076
	TIPO 2	0,086	0,957	0,017	0,028	0,050
HNO ₃	TIPO 1	0,025	22,68	0,241	0,313	0,074
	TIPO 2	0,401	25,78	0,336	0,352	0,027
3HCl:1HNO ₃	TIPO 1	0,022	20,33	0,200	3,456	0,041
	TIPO 2	0,274	24,28	0,542	1,687	0,098

Fonte: Elaborado pela autora.

Constatou-se que as lixiviações com HNO₃ e 3HCl:1HNO₃ apresentaram valores próximos e significativamente maiores quando comparadas com as porcentagens obtidas com HCl.

Dentre os metais destacados, o Cobre é o principal metal de interesse da indústria pois além do seu alto valor comercial ele, ainda, é encontrado em maiores concentrações nas PCIs que em seus minérios. Dentre as lixiviações com melhor desempenho, a com HNO₃ se destacou em sua obtenção, chegando a 22,68 % (m/m) na placa TIPO 1 e 25,78 % (m/m) na placa TIPO 2.

Tendo em vista que as lixiviações com ácido nítrico e água régia obtiveram valores semelhantes, que os preços desses reagentes são parecidos, que produzem o mesmo gás poluente, que a água régia sofre decomposição com o tempo e que o HNO₃ aprestou melhor desempenho na obtenção de cobre, temos que o ácido nítrico é o ácido com melhor vantagens para a aplicação em grande em escala.

Vale destacar, que devido a heterogeneidade das placas, as análises realizadas no presente trabalho, mostram uma estimativa de obtenção dos metais a partir de placas de circuitos impressos, pois as composições das placas variam de acordo com o tempo de fabricação e modelo do equipamento.

6 CONCLUSÃO

A análise por ICP OES, se mostrou eficiente na identificação e determinação dos metais disponibilizados pelas lixiviações ácidas, possibilitando visualizar que a composição das suas placas não divergem muito, assim não sendo necessária uma segregação entre seus tipos em uma aplicação de recuperação a nível industrial.

Com os ensaios hidrometalúrgicos realizados, pode-se concluir que as lixiviações ácidas são eficientes na disponibilização dos metais presentes nas placas de circuito impresso e que o uso do lixiviante adequado contribui significativamente nos resultados obtidos.

Os dois tipos de placas obtiveram bons resultados quando submetidos a ácido nítrico e água régia, com destaque para o ácido nítrico que obteve melhor desempenho na obtenção de cobre, o metal de maior interesse. Já a lixiviação com HCl não apresentou valores satisfatórios.

Como o intuito dos processos hidrometalúrgicos é a recuperação de metais, sugere-se, que para a obtenção das espécies em suas formas metálicas, a partir dos licores obtidos em lixiviações ácidas, sejam realizados processos eletrolíticos que permitam a deposição dos metais, pois essa técnica possibilita a obtenção de metais com altos níveis de pureza e causa menos danos ao meio ambiente quando comparada com as técnicas de precipitação seguida de pirometalúrgia.

REFERÊNCIAS

ABINNE. **Resíduos eletrônico no Brasil – 2021.** *Green eletron*, 2021a. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf . Acesso em: 09 de maio de 2022.

ABINNE. **Quais países produzem mais lixo eletrônico no mundo? Veja como está o Brasil neste ranking.** *Green eletron*, 2021b. Disponível em: < <https://greeneletron.org.br/blog/quais-paises-produzem-mais-lixo-eletronico-no-mundo-veja-como-esta-o-brasil-neste-ranking/> >. Acesso em: 09 de maio de 2022.

BRASIL. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional De Resíduos Sólidos (PNRS).**

BRASIL. Decreto nº 10.240 , de 12 de fevereiro de 2020. **Estabelece normas para a implementação de sistemas de logística reversa obrigatória de produtos eletrônicos de uso doméstico e seus componentes.**

CALDAS, M. P. K. **Síntese de nanopartículas de prata a partir da reciclagem de placas de circuito impresso.** Tese Doutorado em Ciências - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2017.

COSTA, W. K. O. C., **Determinação de metais por ICP OES: decomposição por micro-ondas e análise direta de farinhas e desodorantes.** Tese de Doutorado em Química. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2018.

FERREIRA. D.; DA SILVA, J.; GALDINO, J. **Reciclagem do e-lixo (ou lixo eletroeletrônico).** In: CONNEPI, V, 2010, Maceió – AL. Disponível em: <http://congressos.ifal.edu.br/index.php/connepi/CONNEPI2010/paper/viewFile/1191/597> . Acesso em: 16 de maio de 2022.

FORTI, V.; BALDE, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. ***The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential***, (Bonn, Geneva and Rotterdam: United Nations University/United Nations Institute for Training and Research, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association, 2020). Disponível em: <https://collections.unu.edu/view/UNU:7737#viewAttachments> . Acesso em: 09 de maio de 2022.

FRANCO, A. S.; MOREIRA, C. S.; VASCONCELOS, C. C.; CABRAL, A. B. **Reaproveitamento de placas de circuito impresso: Uma revisão de literatura.** *Diversitas* Jornal. Alagoas, Vol. 6., n. 1, p. 341-351. Janeiro, 2021.

GERBASE, A. E.; OLIVERIRA, C. R. **Reciclagem do lixo de informática: Uma oportunidade para a química.** *Química Nova*, Porto Alegre – RS, V.35, n.7, p. 1486-1492. Abril, 2012.

GUIMARÃES, Y. F. **Recuperação do cobre contido em placas de circuito impresso.** Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

HARRIS, D. C. **Análise química quantitativa**. 8ª Edição. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2012.

MEHL, E. L. M. **Conceitos Fundamentais sobre placas de circuito impresso**. 2011.

Disponível em :

http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te232/textos/PCI_Conceitos_fundamentais.pdf. Acesso em: 6 de junho de 2022.

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

MELO, R. A. C. **Estudo da lixiviação de placas de circuito impresso de computadores desktops obsoletos da UFRN**. Tese de Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2017.

MORAES, V. T. **Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos**. 2010. Tese Doutorado em Engenharia – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

PETTER, P. M. H. **Avaliação da eficiência da lixiviação de metais preciosos das placas de circuito impresso com utilização de lixiviastes alternativos ao cianeto**. Tese de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

ROCHA, A. C.; CERETTA, G. F.; CARVALHO, A. D. P. **Lixo Eletrônico: Um desafio para a gestão ambiental**. Revista Technoeng, Paraná, Vol. I, 2ª Edição, p. 35-49. Dezembro, 2010.

SANTOS, A. L. A. M.; BELLO, N. S.; SOBRAL, L. G. S.; OLIVEIRA, D.M. **Extração de ouro a partir de placas de circuito impresso por cianetação intensiva**. CETEM/MCTI. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1840/4/STA-85.pdf>. Acesso em: 17 de maio de 2022.

SILVA, E. C. **Recuperação de metais em placas de circuito impresso**. 2018. Tese Mestrado em Química – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2018.

SILVA, F. R. **Recuperação de metais em placas de circuitos impressos pelo método de carbonização**. Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2021.

SILVA, M. T. B. **Lixiviação ácida na recuperação de P_2O_5 do minério fosfático sílico-carbonato**. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET/MG. Araxá – MG, 2018.

SKOOG, D. A.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. **Fundamentos de Química Analítica**. Ed. São Paulo: Editora Thomson, 2006.

TUNCUK, A.; STAZI, V.; AKCIL, A.; YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **“Aqueous Metal Recovery Techniques from E-scrap: Hydrometallurgy in Recycling”**, *Minerals Engineering* v. 25, pp. 28-37, 2012.

VEIT, H. M. **Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso**. Tese de Doutorado em Engenharia – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005.

VENTURA, E. A. C. C. **Estudo de processos físicos para recuperação de metais de placas de circuito impresso**. Tese Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Portugal, 2014.

VILELA, P. R. **Decreto obriga empresas a recolherem lixo eletrônico**. Agência Brasil. Brasília – DF, 2020. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/politica/noticia/2020-02/decreto-obriga-empresas-recolherem-lixo-eletronico> . Acesso em: 21 de maio de 2022.

VOGEL, A. I.; MENDHAM, J.; DENNEY, R. C.; BARNES, J. D.; THOMAS, M. J. K. **Análise Química Quantitativa**. Rio De Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 2002.

WINDER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; SHINA-KHETRIWALD, D.; SHENELLMANN, M.; BONI, H. *Global perspectives on e-waste. Environmental Impact Assessment Review*. V. 25. p. 436 – 458. Abril, 2005.