



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

ANA BEATRIZ COSTA

**ESTUDO DOS LIXIVIANTE DE ROTAS HIDROMETALÚRGICAS PARA
EXTRAÇÃO DE METAIS A PARTIR DO LIXO ELETRÔNICO**

FORTALEZA

2022

ANA BEATRIZ COSTA

**ESTUDO DOS LIXIVIANTE DE ROTAS HIDROMETALÚRGICAS PARA
EXTRAÇÃO DE METAIS A PARTIR DO LIXO ELETRÔNICO**

Monografia apresentada ao Curso de Química Bacharelado, do Centro de Ciências, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Química com Habilitação Industrial.

Orientadora pedagógica: Prof.^{ra} D.^{ra} Ruth Maria Bonfim Vidal

Orientador profissional: Dr. Ari Clecius Alves de Lima

FORTALEZA

2022

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

C87e Costa, Ana Beatriz.
Estudo dos lixiviantes de rotas hidrometalúrgicas para extração de metais a partir do lixo eletrônico / Ana Beatriz Costa. – 2022.
51 f. : il. color.

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

Orientação: Profa. Dra. Ruth Maria Bonfim Vidal.
Coorientação: Prof. Dr. Ari Clecius Alves de Lima.

1. Lixiviantes. 2. Metais. 3. Lixo eletrônico. I. Título.

CDD 540

ANA BEATRIZ COSTA

ESTUDO DOS LIXIVIANTES DE ROTAS HIDROMETALÚRGICAS PARA EXTRAÇÃO
DE METAIS A PARTIR DO LIXO ELETRÔNICO

Monografia apresentada ao Curso de Química Bacharelado, do Centro de Ciências, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Química com Habilitação Industrial.

Aprovada em: __/__/____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^{ra} D.^{ra} Ruth Maria Bonfim Vidal (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

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

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

A Deus, Jeová;

Á minha mãe, Francisca Suelene Costa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Jeová, que me deu coragem para sair do meu conforto, crescer em outro lugar, me auxiliou quando mais precisei e, principalmente, o único que sabe a minha caminhada até aqui.

À minha mãe, minha confidente, quem sempre permanece ao meu lado apesar dos meus defeitos e erros, além de ser meu maior exemplo de força.

À professora D.^{ra} Ruth Maria Bonfim Vidal, pela excelente orientação.

Ao Dr. Ari Clecius Alves de Lima pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do estágio e pela oportunidade de estagiar no Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes.

À professora participante da banca examinadora Dr.^a Maria das Graças Gomes pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões além de ser uma inspiração para os alunos.

Às assistentes sociais da Universidade Federal do Ceará pelo tratamento humanitário com os alunos, é muito importante o apoio e escuta delas.

À Universidade Federal do Ceará, pela qualidade do ensino e pela infraestrutura.

À minha tia Rita, por ter me colocado em contato com pessoas maravilhosas e ajudado a me reconectar com Jeová.

Aos meus amigos da graduação Alessandra, Andreza, Wendell e aos demais colegas por todos os momentos, conversas e conhecimentos compartilhado. Assim como minhas amigas Luana, Mariana e Vanessa, que mesmo que não estivessem no mesmo curso ainda estavam compartilhando comigo a vida universitária. Todos estiveram sempre ao meu lado, obrigada pela amizade incondicional e pelo apoio demonstrado ao longo da nossa trajetória e todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

Aos meus amigos virtuais do *twitter*, por me ouvirem, me darem confiança, me incentivarem nos momentos difíceis e compreenderem a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Obrigada me acolherem, guardo com muito carinho todos os momentos e gargalhadas que tivemos.

“Tudo o que ouvimos é uma opinião, não um fato. Tudo o que vemos é uma perspectiva, não a verdade.”

- Marco Aurélio

RESUMO

Atualmente, sobretudo, tem-se enraizado a tecnologia no cotidiano. Diversas tarefas e operações são realizadas por meio de máquinas, desde limpeza até alimentação, oferecendo conforto, agilidade e precisão. Estes aparelhos cercados pelo aprimoramento constante, são moldados a partir da inovação e da obsolescência planejada que colaboram juntas para a volumosa quantidade de lixo, principalmente no que diz respeito a eletrônicos. Assim, este trabalho tem como finalidade estudar as proporções de extração de alguns lixiviantes da hidrometalurgia, sendo este tratamento com lixiviante eficaz para a imensa quantidade de equipamentos eletrônicos por meio da reciclagem de metais, demonstrando ainda a perda de oportunidades que impactam a sociedade e o meio ambiente. O processo hidrometalúrgico utilizado separou os metais dos resíduos através da digestão do material de placas de circuito impresso (PCI) em soluções de água régia, ácido nítrico, ácido sulfúrico e ácido sulfúrico adicionado com peróxido de hidrogênio. Em 6 horas de digestão, a água régia teve como resultado a média de 25,54% já o ácido nítrico, o valor médio de extração foi de 29,69%. Para o ácido clorídrico encontrou-se a média de 1,94% e a solução “piranha” expressou o valor médio de 2,04%. Enquanto que em 24 horas, os valores aumentaram, a água régia demonstrou a média de 28,62% enquanto que para o ácido nítrico concentrado teve valor médio de 34,70%. Para o ácido clorídrico, a média de extração obtida foi de 2,63%, e para o ácido sulfúrico em meio oxidante foi encontrada média de 7,22% de extração. Logo, numericamente, determinou-se o de melhor performance, isto é, o sistema de ácido nítrico em 24 horas. A verificação da influência da agitação ocorreu nesse sistema e concluiu em um valor médio de 39,90%, ou seja, um aumento de 14,98% na remoção dos componentes, evidenciando influência positiva sobre o procedimento lixiviante. Neste estudo, a lixiviação do cobre se destacou pois foi o metal que apresentou as maiores concentrações em qualquer um dos procedimento realizados e os maiores resultados de extração. Existem critérios a serem considerados na decisão final na escolha do lixiviante adequado a cada laboratório como custo, disponibilidade dos reagentes, energia gasta quando se acrescenta a agitação etc. Entretanto, focando na maior proporção de extração de massa, o melhor sistema para lixiviação de metais contidos nas PCIs é composto pelo ácido nítrico como lixiviante acrescido da agitação constante durante 24 horas, de acordo com este estudo.

Palavras-chave: Lixiviantes; Metais; Lixo eletrônico.

ABSTRACT

Today, above all, technology has taken root in everyday life. Several tasks and operations are performed by means of machines, from cleaning to feeding, offering comfort, agility and precision. These devices, surrounded by constant improvement, are shaped from innovation and planned obsolescence that collaborate together for the voluminous amount of waste, especially with regard to electronics. Thus, this work aims to study the proportions of extraction of some leachates from hydrometallurgy, and this treatment with leachate is effective for the immense amount of electronic equipment through the recycling of metals, also demonstrating the loss of opportunities that impact society and the environment. The hydrometallurgical process used separated the metals from the waste by digesting the printed circuit board (PCB) material in solutions of aqua regia, nitric acid, sulfuric acid and sulfuric acid added with hydrogen peroxide. In 6 hours of digestion, aqua regia resulted in an average of 25.54%, while nitric acid had an average extraction value of 29.69%. For hydrochloric acid, an average of 1.94% was found and the “piranha” solution expressed an average value of 2.04%. While in 24 hours, the values increased, the aqua regia showed an average of 28.62% while for concentrated nitric acid it had an average value of 34.70%. For hydrochloric acid, the average extraction obtained was 2.63%, and for sulfuric acid in an oxidizing medium, an average of 7.22% extraction was found. Therefore, numerically, the best performance was determined, that is, the nitric acid system in 24 hours. The verification of the influence of agitation occurred in this system and concluded in an average value of 39.90%, that is, an increase of 14.98% in the removal of components, evidencing a positive influence on the leaching procedure. In this study, copper leaching stood out because it was the metal that presented the highest concentrations in any of the procedures performed and the highest extraction results. There are criteria to be considered in the final decision when choosing the appropriate leachate for each laboratory, such as cost, availability of reagents, energy spent when adding agitation, etc. However, numerically and according to the study carried out, the best system for leaching metals contained in PCIs was concluded to be composed of nitric acid as a leaching agent plus constant agitation for 24 hours.

Keywords: Leaching; Metals; E-waste.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Amostra de placas de circuito impresso proporcionada pela instituição.....	33
Figura 2 – Placas de circuito impresso após processamento manual.....	34
Figura 3 – Sistema de lixiviação montado para o experimento.....	35
Figura 4 – Esquema geral da rota de análise do REEE.....	36
Figura 5 – Equipamento analítico que realiza a técnica de espectrometria de emissão óptica.....	36
Figura 6 – Estrutura interna do ICP-OES.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comparativo da proporção média dos reagentes de acordo com os diferentes tempos.....	42
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes existentes nos resíduos eletroeletrônicos e seus impactos nocivos a saúde.....	27
Tabela 2 – Reagentes mais usados na extração de metais em resíduos eletrônicos.....	31
Tabela 3 – Esboço da estrutura para lixiviação das amostras de PCI.....	34
Tabela 4 – Limites de detecção e limites de quantificação do método em miligrama por quilograma para determinação de metais no ICP-OES do LQI.....	37
Tabela 5 – Proporção média de extração dos lixiviantes em 6 horas.....	41
Tabela 6 – Proporção média de extração dos lixiviantes em 24 horas.....	41
Tabela 7 – Proporção de extração no ácido nítrico concentrado sob condições de agitação em 24 horas.....	43
Tabela 8 – Proporção média dos metais mais relevantes extraídos em 6 horas.....	45
Tabela 9 – Proporção média dos metais mais relevantes extraídos em 24 horas.....	45
Tabela 10 – Proporção média dos metais mais relevantes extraídos em 24 horas sob agitação.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial
Abinee	Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica
Abrelpe	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
LARSE	Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes
LQI	Laboratório de Química Instrumental
MDIC	Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior
NUTEC	Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
PCI	Placas de circuito impresso
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
REEE	Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
UNU	Universidade das Nações Unidas

LISTA DE SÍMBOLOS

% Porcentagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	18
2.1	Objetivo geral	18
2.2	Objetivos específicos	18
3	REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1	Avanços tecnológicos e obsolescência planejada	19
3.2	Resíduos sólidos e a Política Nacional de Resíduos Sólidos	21
3.2.1	<i>Lixo eletrônico</i>	23
3.3	Placas de circuito impresso e metais	24
3.4	Reciclagem	28
3.5	Hidrometalurgia	30
4	METODOLOGIA	33
4.1	Amostragem dos resíduos	33
4.2	Processamento manual	33
4.3	Processamento hidrometalúrgico (Lixiviação ácida)	34
4.4	Análise do procedimento hidrometalúrgico	35
4.4.1	<i>Caracterização</i>	36
4.4.2	<i>Extração</i>	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1	Análise do procedimento hidrometalúrgico	39
5.1.1	<i>Caracterização</i>	39
5.1.2	<i>Extração</i>	40
6	CONCLUSÃO	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

1 INTRODUÇÃO

A ascensão do homem permaneceu constante e lenta até a Revolução Industrial juntamente ao desenvolvimento da economia capitalista. O crescimento ocasionado por esses eventos, tanto economicamente quanto populacional, teve como alicerce a exploração de recursos naturais. A utilização desses recursos acarretou diversos avanços, como o aumento na produção e o constante consumo (MARTINE; ALVES, 2015). Assim como em uma cadeia produtiva, esse acelerado progresso tecnológico aliado à produção pela intensa atividade antrópica resultou em geração de resíduos sem precedentes. Atualmente, sobretudo, tem-se enraizado a tecnologia no cotidiano. Diversas tarefas e operações são realizadas por meio de máquinas, desde limpeza até alimentação, oferecendo conforto, agilidade e precisão. Estes aparelhos cercados pelo aprimoramento constante, são moldados a partir da inovação e da obsolescência planejada que colaboram juntas para a volumosa quantidade de lixo, principalmente no que diz respeito a eletrônicos.

O *The Global E-waste Monitor 2020* aponta que, anualmente, mais de 53 milhões de toneladas de equipamentos eletroeletrônicos e pilhas são descartadas mundialmente, contrastando com o número crescente na produção de aparelhos, cerca de 4% a cada ano. Este resíduo é considerado pela Universidade das Nações Unidas (UNU) como o resíduo que mais cresce atualmente, exibindo que estes eletrônicos descartados no mundo cresceram 21% em apenas 5 anos. Na questão nacional, ainda pelo relatório da UNU, o Brasil descartou, apenas em 2019, mais de 2 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos.

Enquadrado como resíduo sólido, mais especificamente como resíduo de equipamento eletroeletrônico (REEE), o lixo eletrônico, também denominado *e-lixo*, causou discussões constantes sobre seu volume e descarte correto. O relatório de dados da *Green Eletron*, gestora de logística reversa no país, denominado Resíduos Eletrônicos no Brasil 2021 mostra que o país ainda é um dos líderes do ranking acerca da quantidade de resíduo eletrônico, ocupando a quinta posição mundial e a primeira na América Latina. Sendo estas informações anos após a aplicação de leis como por exemplo a implementação, em 2010, da Lei 12.305/2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) com a finalidade de organizar os setores públicos e privados sobre o tratamento destes resíduos. O estatuto abrange todos os materiais que podem ser reciclados ou reaproveitados, sejam domésticos ou industriais. A PNRS ressalta ainda a responsabilidade pela logística reversa, em que o fabricante tem o dever de participar do descarte correto do produto ao fim de sua vida útil.

A sucata eletrônica é complexa e por isso ainda existe preocupação quanto ao seu

descarte correto e reciclagem, mesmo com o estabelecimento de diretrizes legais. Composta por diversas substâncias, desde elementos químicos simples a hidrocarbonetos complexos, os metais são os que se apresentam em maior quantidade chegando a representar mais de 70%. Diante de sua composição diversificada, o processo de reciclagem também se decompõe em várias etapas específicas para cada material como plástico, vidro e metais. Ainda como elemento obrigatório nos aparelhos, existem as Placas de Circuito Impresso (PCI) que fazem parte de todos os equipamentos eletrônicos, nela a quantidade de metais, especialmente o cobre, torna este suposto lixo uma matéria-prima muito interessante e rica do ponto de vista econômico (NATUME; SANT'ANNA, 2011).

Na reciclagem metálica, uma das rotas mais utilizadas é o processo hidrometalúrgico, consistindo na separação dos metais nos resíduos, enfatizada por reações de digestão do material em soluções lixiviantes, ácidas ou alcalinas, e então seguida de etapas de separação como filtração, destilação e precipitação dos metais dissolvidos (GERBASE; OLIVEIRA, 2012).

No Brasil ainda não existe indústria especializada para realizar esses tratamentos, ou seja, parte considerável dos resíduos gerados precisa ser exportada para o devido processamento. Os dados levantados no sistema Aliceweb apontam que, em 2011, um volume superior a 20.000 toneladas de resíduos potencialmente originados de equipamentos eletroeletrônicos foi exportado a partir do país. Paralelamente, registros da *Solving the E-waste Problem*, outra organização da ONU, apresentam a quantidade de material que poderia sofrer reprocessamento – uma tonelada de celulares usados pode conter 3,5 kg de prata, 130 kg de cobre e 340 gramas de ouro. As estatísticas juntas revelam a perda econômica e social, uma vez que a reciclagem desses resíduos pode gerar empregos e reaproveitamento de recursos.

A aplicação da reciclagem e recuperação dos insumos conta também com a diminuição da extração de elementos da natureza através da mineração urbana, fonte de grande geração de efluentes complexos e tóxicos ao ambiente, além de diminuir o gasto energético de processos industriais. A *Ellen MacArthur Foundation* apresentou um estudo em que 75% de toda a energia gasta na indústria é usada na extração e refinamento de matéria-prima. Outro aspecto a ser considerado é o próprio ecossistema. O resíduo coletado, tratado e destinado de forma correta tem menor impacto no meio ambiente. Equipamentos eletrônicos quando desmontados sem adequação, nos inúmeros aterros espalhados pelo país, podem contaminar o solo e as águas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem o objetivo geral de disponibilizar os metais contidos nas placas de circuitos de aparelhos eletrônicos em solução aquosa, de acordo com os processos de hidrometalurgia, avaliando a competência de cada agente lixiviante baseando-se na sua porcentagem de extração junto a seu tempo de digestão e verificar a influência de agitação.

2.2 Objetivos específicos

- Revisar as soluções lixiviantes utilizadas atualmente na hidrometalurgia;
- Disponibilizar em solução os metais contidos nas estruturas das placas de circuito impresso de celulares;
- Realizar caracterização dos metais contidos na amostra pela análise de espectrometria de emissão óptica por indução de plasma (ICP-OES);
- Analisar a porcentagem e tempo de extração da lixiviação de cada reagente, determinando o de melhor performance de acordo com os dados;
- Verificar se existe alteração no resultado de extração sistema com agitação;
- Quantizar os metais mais relevantes da extração de acordo com a massa inicial de amostra; e
- Examinar a eficiência dos lixiviantes selecionados neste estudo, comparando o de melhor performance com outros considerando aspectos de segurança, econômicos etc.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Avanços tecnológicos e obsolescência planejada

A construção humana é estruturada pela ciência e tecnologia, fato este presente desde o domínio do fogo até a era moderna da informação, passando pela domesticação dos animais, pelo surgimento da agricultura e indústria modernas e, principalmente, pela melhora da qualidade de vida no último século. Nessa linha de raciocínio, a resolução de problemas que afligem o homem e seu cotidiano, tais como obter longevidade e mais saúde, trabalhar menos, aumentar tempo de lazer, expandir a comunicação, reduzindo as distâncias que separam as pessoas, seja por meio de mais canais de comunicação ou de melhores meios de transporte, são alguns fatores para os quais os avanços tecnológicos têm contribuído.

No entanto, atualmente, muitos teóricos apontam que a sociedade contemporânea precisa se preparar para lidar com as inconstâncias e instabilidades recorrentes oriundas da ciência e tecnologia, e que somente com observação e cuidado contínuo é possível lidar com os riscos da modernidade. Toda prática inovativa representa potencialmente um risco para as instituições e relações sociais (BECK, 1992; BRUESEKE, 2002). Ou seja, os avanços tecnológicos, juntamente à indústria e empresas, representam um dos resultados dos processos econômicos incertos e instáveis sobre o homem. Desta forma, os efeitos sobre o meio ambiente também são originados da atividade industrial e tecnológica, mas este último não inclui os custos ambientais de produção como a poluição, desmatamento etc.

Ainda sustentam que os efeitos da tecnologia geram saturação do ecossistema, principalmente por meio de poluição atmosférica, hídrica ou resíduos sólidos. As tecnologias modernas, estruturadas no uso intensivo de recursos disponíveis na natureza e emissão de efluentes, representam o principal agente desestabilizador do meio ambiente (ANDRADE, 2004).

Enquanto a economia se desenvolve a partir do desenvolvimento contínuo e cumulativo de novas ferramentas e produtos, ou seja, baseada na nova invenção, o cenário idealizado de sustentabilidade é altamente afetado. Sobressaindo-se então o desperdício de produtos e a superfluidade tecnológica demonstrada nos diferentes modelos e marcas do mercado (CORAZZA, 2001). Nesse contexto, o avanço tecnológico vem se tornando intrínseco à história da vida humana.

Ainda sobre a produção e economia, uma das discussões atuais levantada por Portilho (2005, p. 67):

A abundância dos bens de consumo continuamente produzidos pelo sistema industrial é considerada, frequentemente, um símbolo da performance bem-sucedida das economias capitalistas modernas. No entanto, esta abundância passou a receber uma conotação negativa sendo objeto de críticas que consideram o consumismo um dos principais problemas das sociedades industriais modernas. A partir da construção da percepção de que os atuais padrões de consumo estão nas raízes da crise ambiental, a crítica ao consumismo passou a ser vista como uma contribuição para a construção de uma sociedade sustentável.

Nesse raciocínio, com o avanço da tecnologia, modernização e expansão da economia, o crescimento demográfico e a expansão de empresas passaram a difundir em escalas maiores os mais diversos produtos de consumo pessoal e coletivo. Assim, na lógica, foram desenvolvidas estratégias mercadológicas para estimular a aquisição de bens pelos consumidores, como a obsolescência programada. O método incentiva a compra de novos produtos como eletroeletrônicos, eletrodomésticos, equipamentos de informática e telefonia, vestuário e calçados, entre outros, e o descarte daqueles já obsoletos em curtos períodos de tempo (HOCH, 2016). Segundo Miragem (2013, p. 325) sua definição se daria como "[...] redução artificial da durabilidade de produtos ou do ciclo de vida de seus componentes, para que seja forçada a recompra prematura". Essa redução da durabilidade não é apenas uma menor duração do produto, mas como também a perda ou redução de sua utilidade depois de um período específico de tempo, o que impulsiona o lucro e traz danos ao meio ambiente.

O consumo desenfreado e a prática abusiva lesam os direitos do consumidor e provocam impactos ao meio ambiente, tendo em vista a produção exacerbada de lixo, ao qual não é garantida uma destinação segura e sustentável (HOCH, 2016). Mesmo que a relação entre a sociedade e tecnologia tenha boas raízes no sentido de utilizá-la para avançar, para sobrevivência, para melhoria e conforto, Bauman (2008, p. 45) ainda aponta que “Novas necessidades exigem novas mercadorias, que por sua vez exigem novas necessidades e desejos; o advento do consumismo inaugura uma era de ‘obsolescência embutida’ dos bens oferecidos no mercado e assinala um aumento espetacular na indústria da remoção do lixo.” Isto é, os avanços tecnológicos e a redução do ciclo de vida útil dos produtos acarretam um crescimento exponencial de resíduos, que não possuem descarte pertinente e causam lesões ao ser humano e ao meio ambiente.

3.2 Resíduos sólidos e a Política Nacional de Resíduos Sólidos

Segundo o Banco Mundial, no relatório *What a Waste 2.0*, aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) são gerados mundialmente por ano, e espera-se que em 2050 esse número cresça a 3,40 bilhões de toneladas, isto é, um aumento de quase 70%. Alguns países, para amenizar o impacto, buscam usar tecnologia e inovação, prevalecendo o tratamento como prioridade.

Já em um país de extensão continental e com mais de 210 milhões de habitantes, o Brasil é um dos países que mais gera resíduos sólidos desde materiais, substâncias a objetos descartados. O destino final destes resíduos deveria ser o tratamento economicamente viável, obedecendo a legislação e usando as tecnologias atuais disponíveis, porém a maior parte ainda é despejado a céu aberto, como também lançado nos esgotos ou mesmo queimado. São resíduos extremamente complexos, incluindo como por exemplo os hospitalares, agrícolas, industriais etc., somados aos domiciliares, originados de atividades domésticas em residências urbanas, e os de limpeza urbana, como limpeza de logradouros e vias públicas, todos eles são classificados como resíduos sólidos urbanos.

De acordo com o relatório de 2018, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) revelou que as cidades brasileiras geraram cerca de 79 milhões de toneladas de RSU, sendo coletado 92% desse total, isto é, pouco mais de 72 milhões de toneladas. Do total coletado, 59,5% foi disposto em aterros sanitários, representando o valor de 43,3 milhões de toneladas. O restante 40,5% do total coletado, ou seja, 29,5 milhões de toneladas de resíduos, foi colocado inadequadamente em lixões ou aterros controlados. Ainda remanescendo por volta de 6,3 milhões de toneladas sem ao menos serem coletadas, que seguem sendo depositadas sem controle pelas próprias comunidade e cidades, mesmo quando políticas governamentais determinam a destinação para tratamento e, em último recurso, para aterros sanitários.

Essa questão não é atual, o rápido processo de urbanização ocorrido no Brasil se consolidou com falta de preparo e estrutura, principalmente nesse contexto, em que o excedente de subprodutos das atividades antrópicas supera a capacidade de adaptação do meio ambiente (SILVA *et al.*, 2007). Ainda, este volume de resíduos sólidos sendo gerado é consequência habitual do aumento do consumo e posteriormente equivalente, especialmente, ao consumo de bens eletroeletrônicos nas últimas décadas.

Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), no país, se mantinham até

recentemente sem regulamentação. Alguns Estados e Municípios possuíam legislação específica, as vezes incluindo a categoria de resíduos sólidos. No entanto, juridicamente não havia nenhuma norma nacional que pudesse dar suporte necessário para o desenvolvimento de infraestruturas que fossem responsáveis ou operassem tratamento desse tipo de resíduo. Como já mencionado, esse contexto provem da tardia e rápida industrialização brasileira. Os resíduos eletroeletrônicos não eram prioridades, até que em 1991, o Congresso Nacional começou a debater o que seria a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) dezoito anos depois. Durante o período, a economia brasileira tinha alcançado relativa estabilidade e depois voltado a crescer, focando no mercado interno a partir do aumento do poder de compra de famílias em todo o país (Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial, 2012).

Dessa forma, diante de toda a problemática, em 2 de agosto de 2010, foi instituída a Lei 12.305/2010, regulamentada pelo Decreto 7.404/2010, denominando a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A norma faz a distinção entre rejeito, isto é, a parte não reaproveitável e o resíduo, constituindo materiais que podem ser reaproveitados ou reciclados, além de citar todas as variações de lixo como doméstico, industrial, da construção civil, eletroeletrônico, lâmpadas de vapores mercuriais, agropastoril, da área de saúde. Ela prioriza a não-geração, redução, reutilização e tratamento de resíduos sólidos, como também enquadra o destino final ambientalmente adequado aos rejeitos. Estes objetivos, conseqüentemente, tem o propósito também de reduzir a utilização dos recursos naturais no processo de produção de novos produtos. Ainda contém ações de educação ambiental a fim de aumentar a reciclagem no país e de promover a inclusão social por meio da geração de emprego e renda a catadores de materiais recicláveis. Ademais, também se atribui, o princípio de responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos.

A PNRS representa um marco para a sociedade brasileira em relação, principalmente, ao meio ambiente, demonstrando uma visão avançada na forma de tratar o lixo urbano. O documento “Logística Reversa de Equipamento Eletroeletrônicos: Análise de viabilidade técnica e econômica” desenvolvido pela Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) e o Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior (MDIC), em 2012 (p. 9), enuncia que a norma

Traz uma concepção de vanguarda, ao priorizar e compartilhar, com todas as partes relacionadas ao ciclo de vida de um produto, a responsabilidade pela gestão integrada e pelo gerenciamento ambientalmente adequados dos resíduos sólidos. Dessa forma, o setor público, iniciativa privada e população ficam sujeitos à promoção do retorno dos produtos às indústrias após o consumo e obriga o poder

público a realizar planos para o gerenciamento do lixo. A lei também consagra o viés social da reciclagem, com o estímulo à participação formal dos catadores, organizados em cooperativas.

Um dos pontos mais importantes impostos na política é a "logística reversa". Definida na própria legislação como um instrumento de desenvolvimento econômico e social, a diretriz é caracterizada por um conjunto de ações que viabilizam a coleta e a devolução dos produtos após seu ciclo de vida útil ao setor originário, isto é, o empresarial de modo a ambicionar o reaproveitamento, seja na sua linha de produção ou em outros ciclos produtivos, ou uma destinação final ambientalmente adequada se classificado como rejeito. Para tornar possível o sistema com a logística reversa exigida pela PNRS, todas as partes relacionadas ao processo devem contribuir para despacho dos produtos em fim de vida útil para as opções discutidas anteriormente. Um dos grandes desafios, nesse contexto dos resíduos sólidos, é o custo associado à operacionalização do sistema da logística reversa em um país de enorme extensão como o Brasil e também com as particularidades de cada lugar, mas uma visão consciente mostra que o aparente aumento de custo não é realmente um acréscimo e, sim, uma antecipação de custos que virão posteriormente para remediar o impacto ambiental provocado pelo descarte inadequado de resíduos (LACERDA, 2002). No atual estado de extrema exploração dos recursos naturais, a logística reversa se torna a melhor alternativa na área do desenvolvimento de eletrônicos considerando ainda crescimento e inovação dos produtos, além de contribuir com a sustentabilidade das comunidades.

A eliminação de todo o lixo, seja eletrônico ou não, produzido até o século XXI é utópico e inalcançável. No entanto, reforça a importância da reciclagem como forma de evitar danos ainda maiores ao ambiente e a saúde pública. No âmbito deste trabalho, a coleta e a reciclagem de produtos eletroeletrônicos se mostra urgente na atualidade, em termos, não apenas de se conservarem recursos naturais não renováveis mas, também, de se preservar o atual meio ambiente e evitar que o impacto ambiental seja cada vez maior por esse tipo de produto (CARVALHO *et al.*, 2008).

3.2.1 Lixo eletrônico

O resíduo de equipamentos eletroeletrônicos são todos aqueles produtos que dependem do uso de corrente elétrica ou de campos eletromagnéticos para funcionar. De

acordo com a ABDI (2012), eles podem ser classificados e alocados em quatro categorias gerais:

- ◆ Linha Branca: refrigeradores e congeladores, fogões, lavadoras de roupa e louça, secadoras, condicionadores de ar;
- ◆ Linha Marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED, aparelhos de DVD e VHS, equipamentos de áudio, filmadoras;
- ◆ Linha Azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras, secadores de cabelo, espremedores de frutas, aspiradores de pó, cafeteiras;
- ◆ Linha Verde: computadores desktop e laptops, acessórios de informática, tablets e telefones celulares.

Somente no fim de sua vida útil, esses produtos passam a ser considerados REEEs e, idealmente, adquirem essa classificação quando esgotadas todas as possibilidades de reparo, atualização ou reuso. Alguns deles, especificamente equipamentos categorizados na área de telecomunicações, são estruturados em um ciclo menor devido à obsolescência e à introdução de novas tecnologias ou mesmo à indisponibilidade de peças de reposição, estes aparelhos são substituídos e descartados mais rapidamente.

3.3 Placas de circuito impresso e metais

No lixo eletrônico, os telefones compõem uma fração considerável do total pois são mais acessíveis, de modo geral, as pessoas. O ciclo de vida de um aparelho telefone celular é de aproximadamente um ano, considerando isso, estima-se que cerca de 100 milhões destes aparelhos são descartados no mundo todo, anualmente, e com diversas razões seja devido funcionamento ou porque estão ultrapassados ao modelo de lançamento (RAO, 2006; CUI; FORSSBERG, 2003). Nestes aparelhos pessoais, que são descartados em grandes quantidades, existem as placas de circuito impresso (PCI). As PCI são encontradas, na verdade, em quase todos os equipamentos elétricos e eletrônicos, sendo normalmente compostas por polímeros, cerâmicas e metais (YAMANE *et al.*, 2011). Elas correspondem por aproximadamente 30% de toda a sucata eletrônica gerada. A parte constituída de não metais engloba materiais como epóxi, fibras de vidro e outros aditivos somando o equivalente a cerca de 70% em peso, enquanto os metais como cobre, estanho, chumbo, ferro e níquel constituem

os 30% restantes (MURUGAN *et al.*, 2008).

Em relação a caracterização do material, existem dois tipos de placas de circuito impresso, denominados “FR-4” e “FR-2” que são frequentemente usados em computadores e telefones celulares. O modelo “FR-4” é composto por uma multicamada de resina epóxi e fibra de vidro revestida com cobre enquanto que o tipo “FR-2” é uma única camada de papel de fibra de vidro ou celulose e fenólico revestido com cobre (HALL; WILLIAMS, 2007; MURUGAN *et al.*, 2008). As placas de circuito impresso de telefones celulares são usualmente multicamadas, ou seja, são do tipo “FR-4” demonstrando que a maior parte do cobre é contido dentro da placa. Esse protótipo tecnológico possibilitou o aumento da complexidade dos circuitos em espaços menores (YAMANE *et al.*, 2011).

Na fração metálica, de acordo com Murugan *et al.* (2008), o cobre constitui aproximadamente 17%, a solda é aproximadamente 4%, ferro e ferrita são 3%, e níquel é 2% por peso. Existe também a presença de metais preciosos como ouro, prata e platina em pequenas quantidades. Os metais básicos encontrados em placas de circuito são usados devido a suas propriedades condutoras juntamente a outros como ferro, níquel e paládio dos próprios componentes elétricos e a solda usada para fixá-los nas placas (HALL; WILLIAMS, 2007). Filmes finos de estanho ou prata são usados nas placas de circuito impresso para proteger contra a oxidação, por exemplo (VEIT *et al.*, 2005).

Ainda na quantização metálica, o metal mais significativo é o cobre, usado para formar os circuitos elétricos necessários nas placas de circuito impresso (HALL; WILLIAMS, 2007). Exemplificando sua magnitude, nas placas de telefones celulares usados, considerando que a concentração de cobre é de cerca de 33% em peso, 1 tonelada de circuito impresso placas contém 330 kg de cobre (YAMANE *et al.*, 2011).

No contexto de sua utilização, os metais ganham enfoque pois são um recurso renovável devido a maior parte deles ser usada na indústria de forma bastante elementar, facilitando a recuperação. As principais propriedades físicas dos metais que instigam a sua utilização são a alta resistência, durabilidade, alta densidade, a condutividade tanto elétrica como térmica e o magnetismo, essas características ajudam também na recuperação e separação de partes não metálicas como plásticos, assim como a separação de metais entre si (RAO, 2006).

Mesmo com essas vantagens, a reciclagem apresenta ainda dificuldade devido à sua construção complexa de multicomponente e multicamada (MURUGAN *et al.*, 2008). As

placas de circuito impresso são particularmente, como já mencionado, uma mistura heterogênea de material orgânico, metais e fibra de vidro mas a presença dos metais citados em sua composição impulsiona o estudo sobre sua reciclagem. As PCI são uma matéria prima extremamente notável assim como os resíduos eletrônicos, principalmente em relação a grande concentração de cobre quando comparada a concentração nos minérios de cobre, expondo o potencial dos processos de reaproveitamento dos materiais metálicos. A concentração dos metais nas placas supera o valor encontrado na matéria prima elementar, isto é, nos minérios (LEGARTH, 1997). Exemplificando, a situação atual do cobre, em que suas reservas mundiais atingem cerca de 607 milhões de toneladas de metal contido, em diminuição, e considerando a demanda atual do metal refinado, de aproximadamente 11,8 milhões de toneladas por ano, essas reservas não seriam suficientes para suprir o consumo e abasteceriam o mundo somente cerca de 50 anos (VEIT, 2005).

Ainda, nas PCI existem componentes poluentes ao meio ambiente e que apresentam riscos a saúde pública, quando descartados incorretamente. Por exemplo, o chumbo, encontrado nas soldas das placas, pode causar danos no sistema nervoso central e periférico, como ao sistema endócrino, circulatório e nos rins pois é extremamente tóxico e bioacumulativo. Outros elementos, como o mercúrio que pode causar danos no cérebro e o cádmio que causa danos nos rins, são substâncias bioacumulativas e também estão presentes na composição das placas, mesmo que em quantidades mais baixas (VEIT, 2005). A Tabela 1 a seguir, mostra substâncias não somente presentes em PCIs como também em resíduos eletrônicos no geral.

Tabela 1 – Componentes existentes nos resíduos eletroeletrônicos e seus impactos nocivos a saúde

Componente	Impactos nocivos a saúde
Alumínio	Relação da contaminação crônica do elemento como um dos fatores ambientais sobre a doença de Alzheimer.
Arsênio	Acumula-se no fígado, rins, trato gastrointestinal, baço, pulmões, ossos, unhas; e a longo prazo os efeitos crônicos: câncer de pele e dos pulmões, anormalidades cromossômicas e efeitos teratogênicos.
Cádmio	Acumula-se nos rins, fígado, pulmões, pâncreas, testículos e coração; possui meia-vida de 30 anos nos rins; em intoxicação crônica pode gerar descalcificação óssea, lesão renal, enfisema pulmonar, além de efeitos teratogênicos, isto é, deformação fetal e carcinogênicos.
Bário	Provoca efeitos no coração, constrição dos vasos sanguíneos, elevação da pressão arterial e efeitos no sistema nervoso central.
Cobre	Intoxicações como lesões no fígado.
Chumbo	Acumula-se nos ossos, cabelos, unhas, cérebro, fígado e rins, em baixas concentrações causa dores de cabeça e anemia. Exerce ação tóxica na biossíntese do sangue, no sistema nervoso, no sistema renal e no fígado, constitui-se veneno cumulativo de intoxicações crônicas que provocam alterações gastrointestinais, neuromusculares, hematológicas podendo levar à morte.
Mercúrio	Atravessa facilmente as membranas celulares, sendo prontamente absorvido pelos pulmões, possui propriedades de precipitação de proteínas sendo grave suficiente para causar um colapso circulatório, levando a morte. Doses de 3g a 30g são fatais, apresentando efeito acumulativo e provocando lesões cerebrais, como também efeitos de envenenamento no sistema nervoso central e teratogênicos.
Cromo	Armazena-se nos pulmões, pele, músculos e tecido adiposo, pode provocar anemia, alterações hepáticas e renais, câncer do pulmão.
Níquel	Carcinogênico pois atua diretamente na mutação genética.
Prata	10g deste composto como Nitrato de Prata é letal ao ser humano.

Fonte: Adaptado de SILVA *et al.* (2007).

Ademais os metais pesados, as PCI e outros equipamentos eletrônicos possuem retardadores de chama, com base de bromo, essas substâncias são adicionadas a fim de obter proteção contra ignição ou queima dos aparelhos. Esses materiais são desreguladores hormonais que quando disponíveis no ambiente, existe a possibilidade de alcançar a cadeia alimentar e afetar negativamente a saúde das comunidades (VEIT, 2005).

3.4 Reciclagem

As principais rotas para o tratamento de lixo eletrônico são listadas como a reutilização, remanufatura e reciclagem, bem como incineração e aterro sanitário. Em muitos casos, equipamentos eletrônicos que não são mais úteis para o comprador original ainda têm valor em outras áreas de aproveitamento enquanto que a incineração de lixo eletrônico por incinerador tradicional para os resíduos sólidos urbanos também é uma opção, mas é perigoso pois, por exemplo, o cobre é um catalisador para a formação de dioxinas, substâncias altamente tóxicas, durante o processo. Já no caso da remanufatura, esse é um processo de produção em que os produtos usados, são desmontados, limpos, reparados ou reformados, remontados e testados para produzir equipamentos novos ou semi-novos (WILLIAMS; SHU; FENTON, 2001). A reciclagem significa o reprocessamento dos materiais residuais para a finalidade original ou para outros propósitos, isto é, a reciclagem de lixo eletrônico envolve necessariamente a desmontagem e/ou destruição do equipamento para recuperar materiais (CUI; ZHANG, 2008).

A hierarquia de tratamento de lixo eletrônico estimula primeiramente a reutilização de todo o equipamento, então a remanufatura e depois a recuperação de materiais por diversas técnicas, existindo como último recurso, a eliminação por incineração e aterro sanitário. A reciclagem de lixo eletrônico é um assunto importante não apenas do ponto de tratamento de resíduos, mas também do ponto de aspecto de recuperação de materiais valiosos. Essa restauração se demonstra um grande impulsionador econômico para a reciclagem de lixo eletrônico (CUI; ZHANG, 2008).

Ainda a *Green Eletron*, entidade gestora para a logística reversa de produtos eletroeletrônicos, fundada em 2016 pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (Abinee), informa motivos para a reciclagem dos resíduos eletrônicos envolvendo panoramas ambientais e socioeconômicos. Em relação ao aspecto ambiental, em que se existe a possibilidade de esgotamento dos recursos energéticos do planeta, isso é bastante preocupante. Assim, a *U.S. Environmental Protection Agency*, isto é, a Agência de Proteção Ambiental dos EUA identificou benefícios, como economia de energia e redução de poluição quando sucata de ferro e aço são usadas em vez de materiais extraídos de minérios. A utilização de material reciclado a material primário resulta em economia de energia em escala apreciável (CUI; ZHANG, 2008). Além disso, o custo diminui com o menor uso de energia, o

que seria benéfico para empresas e indústrias. A redução da extração de matéria-prima através da reciclagem reduz também a emissão de gases CO₂ na atmosfera, responsáveis pela intensificação do efeito estufa. Pilhas e baterias, frequentemente presentes em eletrônicos, podem conter metais pesados em sua composição, como chumbo, níquel, mercúrio e cádmio. Em aterros sanitários, lixões ou no próprio meio ambiente, estes elementos podem contaminar o solo, lençóis freáticos e águas. A *Green Eletron* relata que o Brasil produz em média 1,5 milhão de toneladas de lixo eletrônico anualmente, segundo um relatório da ONU. Este enorme volume, quando também descartado em aterros sanitários, destino mais comum que não abriga somente um tipo de resíduo, causa a superlotação desses locais e diminui seu período útil.

Enquanto que na perspectiva socioeconômica, cerca de 7% do ouro do mundo já foi perdido devido ao descarte inadequado. Paralelamente existe uma grande variedade e quantidade de metais ferrosos e não-ferrosos que podem ser recuperados, são materiais de disponibilidade limitada na natureza e, após o fim das reservas, pode causar imensuráveis impactos na produção de inúmeras das mercadorias e ferramentas que hoje são extremamente necessárias no cotidiano. A reciclagem de eletroeletrônicos é um processo que exige funcionários com mão de obra qualificada durante toda sua rota de tratamento, desde o transporte aos processos físico-químicos que os transformam novamente em matéria-prima. Assim, quanto maior a realização de operações de reciclagem, mais emprego. Além disso, em 2019, de acordo com a *Green Eletron*, foram produzidas aproximadamente 50 milhões de toneladas de resíduos eletrônicos mundialmente, essa quantidade de material pode render mais de 250 bilhões de dólares. Este fato demonstra que a reciclagem deve ser explorada a fim de movimentar a economia sustentavelmente. O descarte inadequado, por exemplo, de um telefone celular, aparelho pessoal que contém desde dados de documentos a contas bancárias, traz o risco de que tenham acesso às informações pois não se sabe qual o destino final do material. A forma segura de descartar este tipo de resíduo é através de sistemas oficiais de logística reversa empresarial com altos padrões e normas de segurança.

Por fim, Dias (2003, p. 226) diz que

O desenvolvimento econômico e o bem-estar do ser humano dependem dos recursos da Terra. O desenvolvimento sustentável é simplesmente impossível se for permitido que a degradação ambiental continue. O desenvolvimento econômico e o cuidado com o meio ambiente são compatíveis, interdependentes e necessários. O desenvolvimento econômico podem e devem coexistir com um meio saudável.

3.5 Hidrometalurgia

Os primórdios da hidrometalurgia surgiram no mesmo momento em que os alquimistas almejavam transformar metais básicos em ouro, basicamente suas tentativas eram processos hidrometalúrgicos. O marco memorável inicial foi a invenção da água-régia, solução de ácido clorídrico e ácido nítrico na proporção 3:1, pelo árabe Jabir Ibn Hayyan no século VIII. Essa mistura consegue dissolver ouro e, ainda hoje, é utilizada para tratamento do elemento. A versão moderna da hidrometalurgia data o ano de 1887, quando dois processos importantes foram inventados, o processo de cianetação para tratamento de minérios contendo ouro e o Processo Bayer para a produção de alumina (HABASHI, 2005).

Conceituando o termo, "hidrometalurgia" reúne todos os processos de extração de metais nos quais a principal etapa de separação metal envolve reações de dissolução do material em meio aquoso. A utilização comum e convencional da área inclui a produção de alumina, ouro, urânio, zinco, níquel, cobre, titânio, terras-raras etc. Nos processos, existem etapas que caracterizam a hidrometalurgia e, logo após o preparativo do sólido, seguidamente existe a etapa de lixiviação. A capacidade desta etapa é extremamente importante para a diminuição de perdas do metal solúvel no extrato e de consumo de água durante a rota. A lixiviação é a dissolução do metal ou metais de interesse contido no sólido, posteriormente a adição de uma fase aquosa composta de ácidos, bases ou agentes complexantes, em parâmetros variados de pressão e temperatura (CIMINELLI, 2007).

Outra etapa importante é a recuperação do metal, isto é, a última etapa do fluxograma hidrometalúrgico, em que o tratamento do licor envolve processos tais como: precipitação, adsorção em carvão ativado ou em resinas poliméricas de troca iônica e extração por solventes, por exemplo (CIMINELLI, 2007).

Assim, lembrando que a presença de metais em resíduos eletrônicos é significativa, a utilização da primeira etapa que caracteriza qualquer rota hidrometalúrgica, ou seja, a execução de um processo de lixiviação, objetivando a extração metálica, por meio da adição de um agente ácido, básico ou complexante, se mostra notável (GOUVEIA, 2014). Focando nesses agentes, os lixiviantes mais comuns são o cianeto, halogenetos, tioureia e tiosulfato (JADHAV; HOCHENG, 2015). Alguns reagentes mais usados na lixiviação de lixo eletrônico estão organizados na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Reagentes mais usados na extração de metais em resíduos eletrônicos

Agente lixiviante	Metais extraídos	Referência
Água régia	Au, Cu, Ag	Lee <i>et al.</i> (2010)
	Ag, Pd, Au	Park e Fray (2009a)
	Sn, Cu	Castro e Martins (2009)
Tioureia – Sulfato férrico	Au, Cu, Ag	Lee <i>et al.</i> (2010)
NH ₃ –(NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	Au, Cu, Ag	Lee <i>et al.</i> (2010)
H ₂ SO ₄	Au, Cu, Ag	Lee <i>et al.</i> (2010)
HNO ₃	Sn, Cu	Castro e Martins (2009)
	Au, Cu, Ag	Lee <i>et al.</i> (2010)
	Cu, Pb	Mecucci e Scott (2002)
H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂	Cu	Deveci <i>et al.</i> (2010)
	Cu, Zn, Fe, Ni, Al	Oh <i>et al.</i> (2003)
CuSO ₄ –NH ₄ OH(NH ₄) ₂ S ₂ O ₃	Au, Ag	Oh <i>et al.</i> (2003)
Na ₂ S ₂ O ₃ –CuSO ₄ –NH ₄ OH	Au, Ag	Li e Huang (2010)
H ₂ SO ₄ /HCl	Sn, Cu	Castro e Martins (2009)
HCl	Sn, Cu	Castro e Martins (2009)

Fonte: Adaptado de TUNCUK *et al.* (2012).

A seleção e determinação do lixiviante deve ser feita conforme critérios e contextos, como econômicos (custo de investimento e disponibilidade do reagente), reprodutibilidade, limitações, reciclabilidade, aplicabilidade em maiores escalas e de toxicidade, especificamente no manuseamento e nos impactos ambientais futuros (GOS; RUBO, 2000).

No país, de acordo com Ciminelli (2007, p. 159), “As principais aplicações de processos hidrometalúrgicos no Brasil são representadas pela extração de minérios de ouro (processo convencional, tal como na RPM Kinross, em Paracatu, e refratários - ouro em pirita e arsenopirita - como nas usinas da Anglo Gold Ashanti e São Bento); níquel (lateritas, Votorantim Metais - VM, em Niquelândia); zinco (minérios silicatados e sulfetados, VM em Três Marias e Juiz de Fora) e alumínio (processos Bayer e Hall-Heroult, diversas usinas)”.

No entanto, atualmente, a área tem ganhado bastante foco de experimentação nos

processos de recuperação de metais de resíduos eletrônicos. Já que extrair metais do lixo eletrônico é muito mais barato do que a extração de metais a partir de seus minérios e rochas. Esse caminho é mais lucrativo, porém globalmente apenas 20% dos resíduos são reciclados e, dentro desta parte, somente 30% dos metais são extraídos (LAKSHMI *et al.* 2021). Um relatório da *American Chemical Society: Journal Science and Technology* afirma que a extração de metais valiosos como ouro, prata e cobre é 13 vezes mais barato do que extraí-los dos minérios. Ainda, comparativamente a outros processos metalúrgicos, a hidrometalurgia demonstra-se como mais exata, mais previsível e controlável, com baixo impacto ambiental e com menor capital de investimento, oferecendo elevadas taxas de recuperação, para explorações em pequena escala (GOUVEIA, 2014).

4 METODOLOGIA

4.1 Amostragem

As placas de circuito impresso dos celulares utilizadas foram disponibilizadas pelo Laboratório de Resíduos Sólidos e Efluentes (LARSE) pertencente ao Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC), conforme a Figura 1.

Figura 1 – Amostra de placas de circuito impresso proporcionada pela instituição



Fonte: Autora.

Os modelos das PCI recebidas não foram específicos ou tiveram marca particular, sendo aleatória sua composição ao todo. No entanto, elas tem aspecto, visivelmente, muito antigo. Assim, por isso, possivelmente as placas são “FR-4”, compostas por uma multicamada de resina epóxi e fibra de vidro revestida com cobre, que eram mais frequentemente empregadas nos aparelhos celulares.

4.2 Processamento manual

As placas foram divididas em segmentos menores com ferramentas manuais a fim de proporcionar maior área de contato para a posterior lixiviação, em que se tem a reação de digestão do material amostral, além de adequar o sólido a melhor manipulação e a vidraria utilizada no laboratório. O processamento físico da amostra sólida deu-se de forma rudimentar, ou seja, não houve moagem ou quarteamento. Assim, não foi viável obter uma classificação granulométrica, dispondo assim de um conjunto amostral não homogêneo com

fragmentos claramente irregulares e distintos, conforme Figura 2, demonstrando a necessidade de triplicatas no experimento.

Figura 2 – Placas de circuito impresso após processamento manual



Fonte: Autora.

4.3 Processamento hidrometalúrgico (Lixiviação ácida)

O experimento foi realizado explorando a capacidade digestora de quatro solventes, sendo eles: água régia (proporção 3:1 de HCl e HNO₃), ácido nítrico concentrado, ácido clorídrico concentrado e ácido sulfúrico concentrado adicionado de peróxido de hidrogênio P.A. (proporção 3:1 de H₂SO₄ e H₂O₂), mais conhecida como solução “piranha”.

No processo da lixiviação, usou-se a proporção de 1g/20mL de estudos prévios como Park e Fray (2009), isto é, a cada grama da amostra utilizou-se 20mL do lixiviante. Além disso, estudou-se o processo de extração em dois tempos, 24 horas e 6 horas em temperatura e condições ambiente. Assim, a Tabela 3 ilustra o procedimento:

Tabela 3 – Esboço da estrutura para lixiviação das amostras de PCI

Reagente	Tempo (horas)	Razão massa/solvente	
Água régia	24	1g/20mL	Triplicatas
	6		
Ácido nítrico	24	1g/20mL	
	6		
Ácido clorídrico	24	1g/20mL	
	6		
Solução “piranha”	24	1g/20mL	
	6		

Fonte: Elaborada pela autora.

Ainda, após resultados desta etapa, elegeu-se o solvente e o tempo com melhor desempenho na proporção de extração. Com a seleção desses parâmetros além da mesma razão massa e solvente, realizou-se novamente triplicatas do procedimento sob circunstâncias de agitação, verificando a influência desse fator.

A Figura 3 abaixo demonstra o sistema formado para a lixiviação das amostras, posteriormente colocado na capela durante o tempo determinado.

Figura 3 – Sistema de lixiviação montado para o experimento

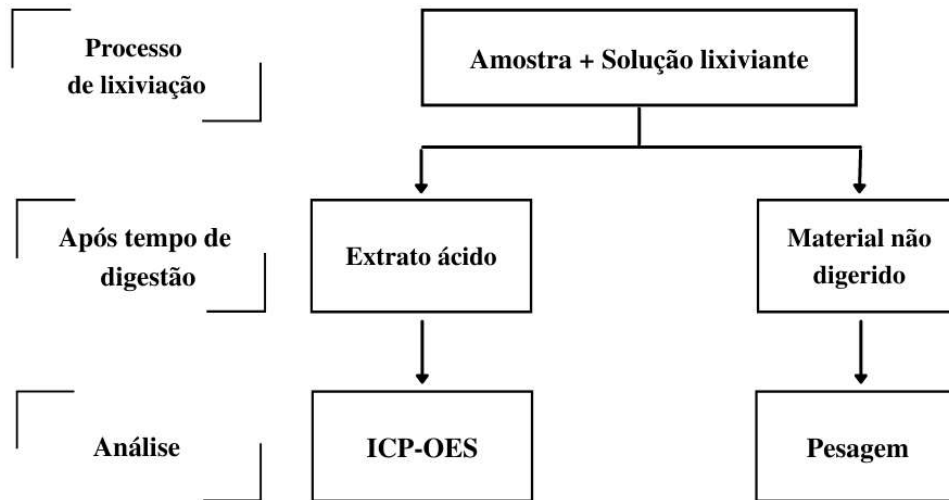


Fonte: Autora.

4.4 Análise do procedimento hidrometalúrgico

Após o processo hidrometalúrgico, o estudo dos lixiviantes passou por dois tipos de análise, utilizando tanto a solução mãe contendo os componentes que foram solubilizados devido a acidez quanto o material que não foi solubilizado. A Figura 4 apresenta um esquema geral da rota de análise do resíduo eletroeletrônico, mais especificamente PCIs, neste trabalho. Ainda, após o procedimento lixiviante, o sistema seguiu para filtração utilizando papel-filtro quantitativo de filtragem rápida para, então, uma alíquota do extrato ácido resultante ser colocada em balão volumétrico de 100mL, completando e aferindo o volume após. As soluções preparadas seguiram para análise química feita por ICP-OES. Assim, restou-se material no papel de filtro. A parte não lixiviada foi lavada com água destilada e levada a estufa para secagem a 100°C até peso constante, obtendo assim a massa final para cálculos de extração.

Figura 4 – Esquema geral da rota de análise do REEE



Fonte: Elaborada pela autora.

4.4.1 Caracterização

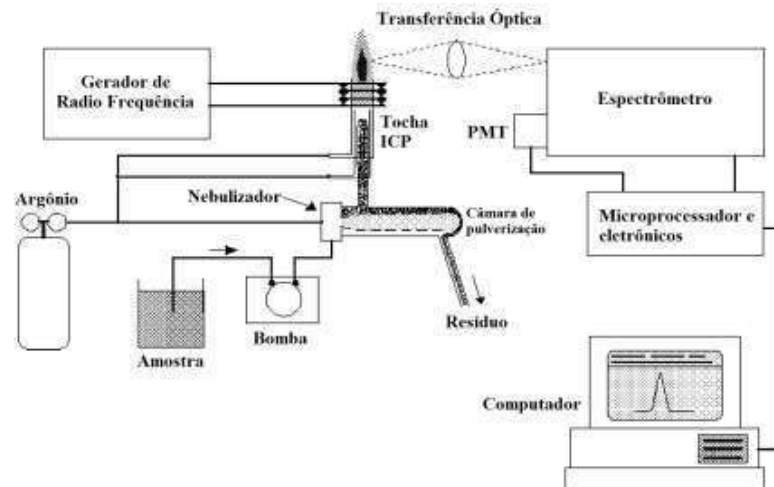
Para a determinação dos componentes metálicos que foram extraídos das placas recorreu-se a técnica de análise química por espectrometria de emissão óptica com acoplamento de plasma induzido, em inglês *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry* (ICP-OES). A identificação e descrição do extrato ácido foram realizadas em um aparelho ICP-OES, como a Figura 5 exemplifica, da marca Thermo Scientific, modelo iCAP 6000 Series com visão de plasma axial. Sua estrutura e funcionamento são explanados pela Figura 6.

Figura 5 – Equipamento analítico que realiza a técnica de espectrometria de emissão óptica.



Fonte: Google imagens.

Figura 6 – Estrutura interna do ICP-OES



Fonte: Google imagens.

Os parâmetros utilizados como precisão ($\leq 20\%$), coeficiente de correlação (0,99), limite de detecção (LD) e limite de quantificação (LQ) conforme Tabela 4, como também a calibração do aparelho foram todos pré estabelecidos pelo Laboratório de Química Instrumental (LQI) conforme o “Manual de garantia da qualidade analítica”.

Tabela 4 – Limites de detecção e limites de quantificação do método em miligrama por quilograma para determinação de metais no ICP-OES do LQI

Elemento	LD (mg/Kg)	LQ (mg/Kg)	Elemento	LD (mg/Kg)	LQ (mg/Kg)
Alumínio (Al)	0,005	0,05	Magnésio (Mg)	0,001	0,1
Arsênio (As)	0,001	0,01	Manganês (Mn)	0,0005	0,005
Boro (B)	0,03	0,1	Molibdênio (Mo)	0,0005	0,005
Bário (Ba)	0,0005	0,005	Sódio (Na)	0,01	0,1
Berílio (Be)	0,0005	0,005	Níquel (Ni)	0,0005	0,01
Bismuto (Bi)	0,002	0,01	Fósforo (P)	0,01	0,03
Cálcio (Ca)	0,005	0,1	Chumbo (Pb)	0,001	0,01
Cádmio (Cd)	0,0005	0,001	Antimônio (Sb)	0,002	0,005
Cobalto (Co)	0,0005	0,005	Escândio (Sc)	0,0005	0,01
Cromo (Cr)	0,0005	0,01	Selênio (Se)	0,002	0,01
Cobre (Cu)	0,0005	0,05	Estanho (Sn)	0,001	0,02
Ferro (Fe)	0,005	0,1	Estrôncio (Sr)	0,001	0,01
Potássio (K)	0,005	0,1	Vanádio (V)	0,0005	0,005
Lítio (Li)	0,005	0,1	Zinco (Zn)	0,001	0,05

Fonte: Laboratório de Química Instrumental do NUTEC.

4.4.2 Extração

A percentagem de extração foi calculada a partir das massas iniciais e finais do material. Após o tempo de digestão, filtrou-se o sistema heterogêneo contendo o ácido e o material, e com isso houve a separação do material restante. Por sua vez, este material não digerido foi levado a estufa até peso constante para obtenção da sua massa final. Para quantização da extração dos metais, os valores de concentração metálica foram obtidos pela análise de ICP-OES com os mesmos parâmetros e considerações utilizados na caracterização, a partir da concentração conseguiu-se a massa do elemento e, por fim, uma porcentagem em relação a massa de amostra inicial.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise do procedimento hidrometalúrgico

Para os experimentos de lixiviação ácida, utilizou-se aproximadamente 5 gramas de amostra dispostas em 100mL do solvente ácido concentrado (Água régia, ácido nítrico, ácido clorídrico e ácido sulfúrico com peróxido de hidrogênio) e realizou-se triplicatas devido à irregularidade das frações de PCI para se obter maior representatividade.

5.1.1 Caracterização

Com o licor ácido resultante, foi realizada a análise por ICP-OES para caracterização dos componentes presentes nas PCI. Juntamente aos extratos aquosos que lixiviaram as amostras, também foram feitas leituras no equipamento de brancos dos reagentes a fim de verificar a interferência dos elementos e concentrações já inerentes aos ácidos utilizados no resultado do procedimento. Os resultados destes testes brancos foram considerados na avaliação da extração obtida das substâncias contidas nas placas. Os resultados da análise demonstraram que elementos como Arsênio, Bismuto, Molibdênio, Antimônio, Selênio e Vanádio estavam fora dos limites de detecção e quantização do aparelho em todos os solventes.

Na análise, elementos como Be, Cd, Co, Mn, Sr e Sc tiveram concentrações traços. Em todas as soluções ácidas, Ba e B sempre aparecem em quantidades regulares e baixas enquanto que elementos como Na, Ca, K, P, Mg e Zn usualmente se mostram em maiores valores, provavelmente devido a composição variada das PCI, envolvendo resinas, materiais orgânicos etc. Já o elemento Fe, apresentou-se somente na lixiviação contendo ácido nítrico de 24 horas, neste caso, é provável a contaminação das soluções, ou mesmo contaminação de ferrugem por contato com outros componentes dos aparelhos pois o branco não exibe concentração de ferro. No restante das soluções, o elemento estava fora dos limites de detecção e quantização da análise. Em contrapartida, o chumbo se mostra notável nas concentrações mesmo considerando os valores dos brancos. Os metais restantes Al, Cu, Ni e Sn foram efetivamente disponibilizados em meio aquoso pois as concentrações obtidas tiveram valores elevados e são provenientes da amostra.

A presença do chumbo nos extratos ácidos que digeriram as PCI chama a atenção para a necessidade de tratamento do resíduo ainda mais, pois o acréscimo na contaminação do

ambiente resulta em uma cadeia de problemas, como já mencionado, envolvendo os diversos organismos e comunidades dependentes desses locais, desde a redução no crescimento e até a extinção de vegetações. Outro ponto importante é a contaminação das águas superficiais, principalmente em áreas de risco que não possuem saneamento básico, contribuindo na contaminação toxicológica direta para as pessoas, os animais e os microrganismos, isto é, toda a cadeia (ALVES *et al.*, 2008). Mesmo que inicialmente o elemento não esteja disponibilizado, por não haver destinação adequada e serem simplesmente depositados em aterros, eles acabam passando por processos lixiviantes naturais como a chuva ácida. Atualmente, o chumbo é o segundo mais perigoso na lista classificatória de prioridade da Agência de Proteção Ambiental americana, perdendo somente para o Arsênio (As) (ATSDR, 2005).

5.1.2 Extração

Todo o processo de lixiviação foi realizado na temperatura de 27°C, isto é, sob condições normais de meio ambiente e para determinar a proporção de extração, a partir dos procedimentos de lixiviação, realizou-se pesagem com o material não digerido nos sistemas de água régia, ácido nítrico concentrado, ácido clorídrico concentrado e ácido sulfúrico em meio oxidante. As massas das amostras foram pesadas anterior e posteriormente a cada tempo determinado, subtraindo a massa restante das frações das placas da massa inicial. As Tabelas 5 e 6 demonstram os dados das médias de extração e seus desvios em cada tempo de digestão.

Tabela 5 – Proporção média de extração dos lixiviantes em 6 horas

Lixivante	Proporção de extração (%)	Proporção média de extração (%)	Desvio padrão	Desvio padrão relativo (%)
HCl/HNO₃ (3:1)	26,96	25,54	1,23	4,84
	24,70			
	24,96			
HNO₃	30,77	29,69	1,40	4,73
	28,10			
	30,20			
HCl	1,56	1,94	0,52	27,30
	1,70			
	2,54			
H₂SO₄/H₂O₂ (3:1)	1,05	2,09	0,94	45,21
	2,33			
	2,90			

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 6 – Proporção média de extração dos lixiviantes em 24 horas

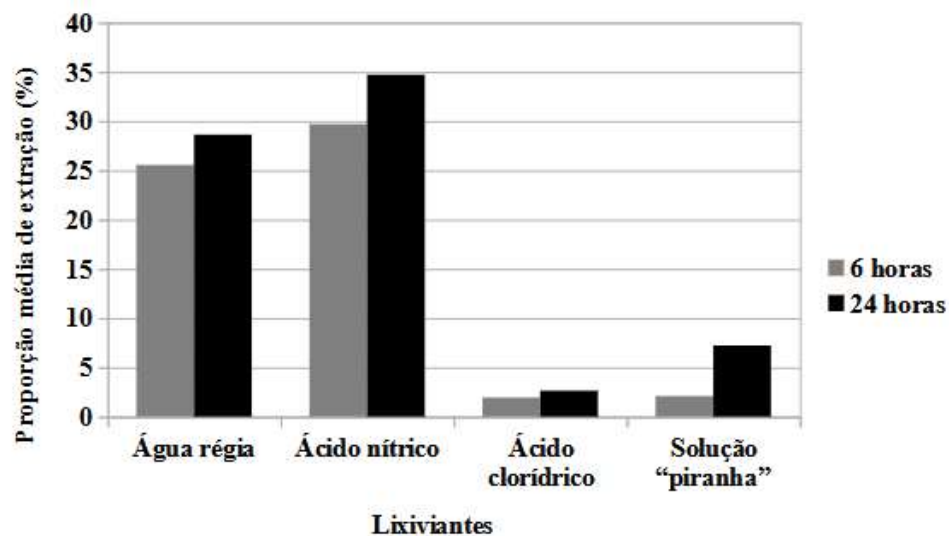
Lixivante	Proporção de extração (%)	Proporção média de extração (%)	Desvio padrão	Desvio padrão relativo (%)
HCl/HNO₃ (3:1)	26,57	28,62	1,78	6,22
	29,74			
	29,56			
HNO₃	34,27	34,70	1,92	5,53
	33,03			
	36,80			
HCl	2,23	2,63	0,39	15,08
	2,62			
	3,02			
H₂SO₄/H₂O₂ (3:1)	2,89	7,22	4,51	62,55
	6,86			
	11,91			

Fonte: Elaborada pela autora.

Com os dados anteriores, nos diferentes tempos de digestão da amostra, a média para cada processo lixivante variou de acordo com a natureza do reagente. No tempo de 6 horas, a água régia teve como resultado a média de 25,54%. Para o ácido nítrico, o valor

médio de extração foi de 29,69% e para o ácido clorídrico encontrou-se a média de 1,94%, já a solução “piranha” expressou o valor médio de 2,04%. Em 24 horas, houve um acréscimo nas extrações dos componentes pois, como esperado, um tempo maior de exposição ao ácido resulta em mais disponibilização dos metais em solução. Assim, para a água régia, obteve-se a média de 28,62% de extração amostral enquanto que para o ácido nítrico concentrado, encontrou-se o valor médio de 34,70%. Para a lixiviação com ácido clorídrico, a média de extração demonstrou ser de 2,63%, já para o ácido sulfúrico em meio oxidante, foi encontrada média de 7,22% de extração. O Gráfico 1 apresenta um comparativo em que, numericamente, o de tempo de 24 horas com o reagente HNO₃ tem o melhor resultado.

Gráfico 1 – Comparativo da proporção média dos reagentes de acordo com os diferentes tempos



Fonte: Autora.

Deste modo, para verificar a influência da agitação sobre o processo, realizou-se a lixiviação novamente com os parâmetros anteriores, que obtiveram as maiores extrações, acrescido do diferencial de agitação. A Tabela 7 expõe os resultados das proporções de extração com a agitação, concluindo em um valor médio de 39,90%. Comparando ao número anterior, em que não há variação nas condições, houve um aumento de 14,98% na remoção dos componentes, o que evidencia influência positiva sobre o procedimento lixivante. A agitação se destaca pela homogeneização da solução e pelo maior contato superficial da amostra com o reagente, principalmente, quando não houve possibilidade de classificação granulométrica pela irregularidade das frações das placas que compõem as amostras.

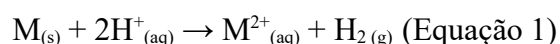
Tabela 7 – Proporção de extração no ácido nítrico concentrado sob condições de agitação em 24 horas

Lixiviante	Proporção de extração (%)	Proporção média de extração (%)	Desvio padrão	Desvio padrão relativo (%)
HNO ₃	42,36	39,90	3,31	8,29
	41,20			
	36,13			

Fonte: Elaborada pela autora.

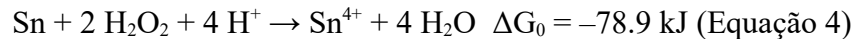
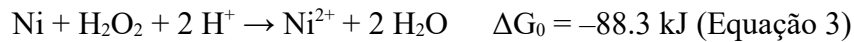
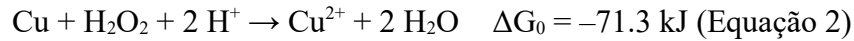
De acordo com os dados, a digestão de 24 horas, sob condições ambiente, resultou em um bom rendimento com os reagentes ácido nítrico concentrado e água régia, possuindo valores médios de 34,70% e 28,62%, respectivamente. Mesmo em 6 horas de dissolução dos materiais, obteve-se as proporções médias de 29,69% e 25,54%, valores não tão discrepantes. Estes rendimentos notáveis já eram esperados pois a água régia é composta por um ácido forte e um oxidante, ela é bastante discutida na literatura no âmbito da extração de ouro e prata enquanto que o ácido nítrico é reconhecido como um dos agentes oxidantes mais eficientes, além de ser um ácido forte também. Estudos como Madenoglu (2005) relatam grandes extrações de cobre e ouro a partir das PCIs usando água régia enquanto que Mecucci e Scott (2002) descrevem extrações de cobre e chumbo maiores que 95% utilizando o ácido nítrico.

Sobre a lixiviação com somente o HCl concentrado e o ácido sulfúrico em meio oxidante, obteve-se rendimento classificatório baixo, mesmo não comparando aos outros reagentes. De maneira geral, a extração não é satisfatória e não justifica a produção de resíduos após o processo. Os dois reagentes puros não possuem grandes potenciais de redução o que assinala seu desempenho com a solubilização dos metais. Além disso, a característica oxidante do ácido sulfúrico se manifesta somente a quente. Como a solução mistura com o peróxido de hidrogênio já é bastante exotérmica, o aquecimento não se torna viável devido ao aumento de riscos e acidentes. Nesse tópico de oxirredução, a reação geral de dissolução dos metais (Equação 1), para metais bivalentes, necessita não apenas de um meio ácido mas também de um agente oxidante.



Estudos como Silva *et al.* (2020) demonstram a espontaneidade das reações ácidas com metais e um agente oxidante, no caso, o peróxido de hidrogênio a 50°C. Além disso, o estudo também verifica influência na lixiviação a partir da natureza do ácido utilizado, seja ele forte ou fraco, e seu ânion, sendo ligante forte ou fraco. Ainda, as Equações de 2 a 5 de

Silva *et. al* (2020) exemplificam e ratificam a indispensabilidade de um reagente com maior potencial de redução.



Ainda, estudos como Quinet *et al.* (2005) e Deveci *et al.* (2010) mostram que a concentração de H_2O_2 e a temperatura são aspectos muito influentes na extração de metal utilizando o lixo eletrônico. Desse modo, a solução “piranha” demonstrou uma pequena maior eficiência em relação ao ácido clorídrico concentrado em virtude da adição do peróxido de hidrogênio, substância com poder oxidante. A presença de oxigênio produz deslocamento reacional favorecendo a oxidação do metal. Todavia, o peróxido de hidrogênio não foi adicionado em grande porção e também não tem poder oxidante equivalente ao ácido nítrico, que possui também alto grau de ionização como ácido forte, conseqüentemente, os resultados de extração não são correspondentes. Esses resultados de rendimentos não apreciáveis são expressos nos dois tempos de digestão, excluindo a possibilidade de utilização das substâncias, isto é, tanto o ácido clorídrico quanto a solução “piranha”.

Deste modo, se o critério primordial for a maior extração possível do material, deve-se utilizar ácido nítrico concentrado sob agitação constante e, em relação ao tempo de exposição da amostra, considerando apenas o fator numérico das extrações, 24 horas é o de melhor performance.

Para análise quantitativa dos metais, utilizou-se o extrato ácido de cada sistema lixiviante, a solução foi filtrada e depois colocada em vidraria para etapa posterior. Deste modo, realizou-se diluição de alíquota do licor mãe para balão de 100mL, seguindo após para a análise no ICP-OES e obtendo as concentrações em ppm dos metais extraídos. Considerando a diluição e densidade da água igual a 1g/mL, encontrou-se o valor de concentração de cada metal no extrato ácido inicial, conseqüentemente, a massa também e depois se calculou a proporção dos elementos extraídos usando a massa inicial média de amostra.

Na discussão de uma extração seletiva, com finalidade de reaproveitamento de metais determinados, os elementos que tiveram concentrações notáveis nos tempos de lixiviação foram o Alumínio, Níquel, Estanho e, principalmente, Cobre, metais com valores

economicamente significativos com a reciclagem. Existe também a presença do chumbo que conseguiu se destacar, mas seu aspecto relevante é seu impacto nocivo socioambiental. As Tabelas 8 e 9 demonstram as proporções médias dos metais, isto é, a massa percentual do elemento que se conseguiu extrair de massas iniciais de aproximadamente 5 gramas, de acordo com cada tempo de digestão e reagente.

Tabela 8 – Proporção média dos metais mais relevantes extraídos em 6 horas

Lixiviante	Proporção média dos metais extraídos (%)				
	Al	Cu	Ni	Pb	Sn
HCl/HNO ₃ (3:1)	0,02	17,22	0,38	0,07	0,43
HNO ₃	0,06	18,28	0,36	0,02	0,05
HCl	0,01	0,29	0,00	0,07	0,04
H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ (3:1)	0,14	1,29	0,05	0,00	0,08

Fonte: Elaborada pela autora.

Tabela 9 – Proporção média dos metais mais relevantes extraídos em 24 horas

Lixiviante	Proporção média dos metais extraídos (%)				
	Al	Cu	Ni	Pb	Sn
HCl/HNO ₃ (3:1)	0,35	23,29	0,46	0,07	1,47
HNO ₃	0,54	25,91	0,41	0,03	0,30
HCl	0,07	1,01	0,02	0,01	0,03
H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂ (3:1)	0,16	1,59	0,02	0,00	0,15

Fonte: Elaborada pela autora.

Novamente, os reagentes ácido clorídrico e ácido sulfúrico em meio oxidante exibiram porcentagens não apreciáveis se comparadas aos outros reagentes do processo deste trabalho, em razão dos mesmos pontos anteriores que promovem desempenho não satisfatório. Ainda mais em particular com o cobre que é menos reativo que o hidrogênio e, assim, o metal não consegue reagir com somente o ácido clorídrico concentrado. O ácido nítrico concentrado e água régia expressaram melhores proporções de extrações, variando de acordo com a natureza de cada metal e a interação entre eles. No entanto, apesar dos valores dos metais não serem excepcionais, em escalas maiores de aplicabilidade podem ter rendimento palpável já que existem toneladas de lixo eletrônico, constituído não somente de

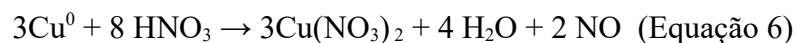
PCIs. A Tabela 10 mostra a alteração nos valores de média de extração dos metais mais relevantes quando submetidos a um sistema com agitação, este formado também pelo reagente HNO₃ concentrado e pelo tempo de digestão de 24 horas.

Tabela 10 – Proporção média dos metais mais relevantes extraídos em 24 horas sob agitação

Lixiviante	Proporção média dos metais extraídos (%)				
	Al	Cu	Ni	Pb	Sn
HNO ₃	0,27	23,49	0,67	0,02	0,12

Fonte: Elaborada pela autora.

Com os valores exibidos, vê-se que as porcentagens de extração dos outros metais não se equiparam ao destaque da lixiviação do cobre. Diante de todos os dados, o cobre foi o metal que apresentou as maiores concentrações em qualquer um dos procedimentos realizados e os maiores resultados de extração. Este metal tem diversas aplicações, como já foi discutido, e tem valor comercial. Sua reciclagem através do lixo eletrônico e da hidrometalurgia pode ser muito benéfica industrial e ambientalmente uma vez que a fração contida nas minas de cobre economicamente interessantes tinham na ordem de 4% do metal, no começo do século e hoje essas minas exploradas têm no máximo 1% de cobre (HAYES, 1993). As proporções médias do elemento encontradas no ácido nítrico e água régia foram 18,29% e 17,22% em 6 horas, respectivamente. Em 24 horas, obteve-se valores ainda maiores, como o esperado, 23,29% para a água régia e 25,91% para o ácido nítrico, mais de ¼ da massa de amostra utilizada. Assim, o cobre corresponde a uma grande fração dos componentes das PCIs. Ainda mais, nas 24 horas com agitação no ácido nítrico, o valor médio obtido de extração do cobre foi de 23,49%, não exibindo influência positiva no valor da extração do elemento. O cobre reage com o HNO₃ conforme a Equação 6, sendo os nitratos substâncias solúveis em água e, portanto, detectável no ICP-OES.



No âmbito da seleção dos lixivantes, as extrações realizadas com a água régia e o ácido nítrico concentrado tem valores significativos em ambos os tempos. Eles tem pequena diferença na faixa de preço e durante o processo formam gases tóxicos, como gás cloro e dióxido de nitrogênio, assim não há diferença na escolha na perspectiva de segurança no experimento. Logo, há diversos critérios e contextos a serem considerados na decisão final na

escolha do lixiviante adequado a cada laboratório como custo, disponibilidade dos reagentes, energia gasta quando se acrescenta a agitação etc. Entretanto, focando na maior proporção de extração de massa, o melhor sistema para lixiviação de metais contidos nas PCIs é composto pelo ácido nítrico como lixiviante acrescido da agitação constante durante 24 horas, de acordo com este estudo.

6 CONCLUSÃO

Nas últimas décadas, a área tecnológica da hidrometalurgia tem investido na pesquisa de processos minimamente poluentes, mais eficientes e de menor custo para a reciclagem de lixo eletrônico. Explorando a lixiviação a partir de vários ácidos, como foi abordado na revisão da literatura, além de estudos com a biolixiviação e lixiviação quelante, obtêm-se progressos cada vez melhores. Paralelamente, o avanço e melhoria na extração resulta em um lixiviado mais complexo para ser processado (SILVA *et al.*, 2020). Neste estudo, a caracterização metálica das amostras de placas de circuito impresso pela análise química de ICP-OES demonstrou uma ampla variedade de elementos, devido a sua composição de multicamadas variando materiais não metálicos, como epóxi e fibras de vidro, e metais. Elementos como Na, Ca, K, P, Mg e Zn usualmente em todos os lixiviantes se mostraram presentes, Fe e Pb apareceram em pequenas concentrações e os metais de valor econômico como Al, Cu, Ni e Sn apresentaram concentrações com valores elevados. Além disso, a presença desses elementos nos resultados mostra que se conseguiu disponibilizar os metais contidos nas amostras em solução.

No parâmetro de tempo, em 6 horas, a água régia teve como resultado a média de 25,54%. Para o ácido nítrico, o valor médio de extração foi de 29,69% e para o ácido clorídrico encontrou-se a média de 1,94%, já a solução “piranha” expressou o valor médio de 2,04%. Enquanto que em 24 horas, a água régia demonstrou a média de 28,62% e o ácido nítrico concentrado teve valor médio de 34,70%. Para o ácido clorídrico, a média de extração obtida foi de 2,63%, e para o ácido sulfúrico em meio oxidante foi encontrada média de 7,22% de extração. Diante do exposto, o tempo de digestão em 24 horas, sob condições ambiente, teve bom rendimento com o ácido nítrico concentrado e água régia, mesmo em 6 horas de dissolução dos materiais, obteve-se as proporções médias com valores próximos.

As porcentagens da lixiviação com o ácido clorídrico concentrado e a solução piranha, de maneira geral, são muito inferiores e não são classificadas como satisfatórias. Logo, numericamente, determinou-se o sistema de ácido nítrico em 24 horas como o de melhor performance. A verificação da influência da agitação ocorreu nesse sistema e concluiu em um valor médio de 39,90%, provendo aumento de 14,98% na remoção dos componentes, evidenciando influência positiva sobre o procedimento lixivante.

Neste estudo, a lixiviação do cobre se destacou pois foi o metal que apresentou as maiores concentrações em qualquer um dos procedimento realizados e os maiores resultados de extração. As proporções médias mais relevantes do elemento foram encontradas no ácido

nítrico e água régia com valores de 18,28% e 17,22% em 6 horas, respectivamente. Em 24 horas, obteve-se valores médios ainda maiores como 23,29% para a água régia e 25,91% para o ácido nítrico. Ainda em 24 horas com agitação constante, o valor médio obtido de extração do cobre foi de 23,49%, não exibindo influência positiva no valor da extração do elemento. A proporção do elemento alcançada nas extrações identificam as PCI não como lixo mas como matéria-prima para a obtenção do metal.

A escolha do lixiviante mais adequado envolve diversos fatores mas as extrações com a água régia e o ácido nítrico concentrado tem valores próximos e aceitáveis. Entretanto, focando na maior proporção de extração de massa, o melhor sistema para lixiviação de metais contidos nas PCIs é composto pelo ácido nítrico como lixiviante acrescido da agitação constante durante 24 horas, de acordo com este estudo. Ainda, a seleção e combinação de métodos de separação e recuperação após a etapa de lixiviação são definidos de acordo, também, com o lixiviante utilizado. Assim, a extração proporcionada pelo processo relacionada a concentração de metais nos lixiviados, somada a elementos alvos específicos e impurezas, são todos aspectos que complexam a área e que induzem a pesquisa, ainda em escala laboratorial. Tratamento e lixiviações mais eficientes, de baixo capital e minimamente nocivas ao meio ambiente são necessárias para garantir o futuro da terra quanto aos resíduos sólidos eletrônicos (SILVA *et al.*, 2020).

REFERÊNCIAS

- A CIÊNCIA e a tecnologia como estratégia de desenvolvimento. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, 2019. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/116-a-ciencia-e-a-tecnologia-como-estrategia-de-desenvolvimento#:~:text=Por%20meio%20dos%20seus%20m%C3%A9todos,a%20humanidade%20construiu%20at%C3%A9%20aqui>. Acesso em: 28 mar. 2022.
- ALVES, J. C. *et al.* Absorção e distribuição de chumbo em plantas deetiver, jureminha e algaroba. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1329-1336, 2008.
- ANDRADE, T. Inovação tecnológica e meio ambiente: a construção de novos enfoques. **Ambiente & sociedade**, v. 7, p. 89-105, 2004.
- AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos**: análise de viabilidade técnica e econômica. Brasília, 2012.
- ATSDR. Priority list of hazardous substances. **Agency for toxic substances and disease registry. Division of Toxicology and Human Health Sciences**, 2005.
- BAUMAN, Z. **Vida para consumo: a transformação das pessoas em mercadoria**. Rio de Janeiro: Zahar, 2008.
- CIMINELLI, V. S. T. Hidrometalurgia, 2007.
- CORAZZA, R. Políticas públicas para tecnologias mais limpas: uma análise das contribuições da economia do meio ambiente tese defendida no Instituto de Geociências. **Unicamp, Campinas**, 2001.
- CUI, J.; FORSSBERG, E. Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: a review. **Journal of hazardous materials**, v. 99, n. 3, p. 243-263, 2003.
- CUI, J.; ZHANG, L. Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. **Journal of hazardous materials**, v. 158, n. 2-3, p. 228-256, 2008.
- DEVECI, H. *et al.* Extraction of copper from scrap TV boards by sulphuric acid leaching under oxidising conditions. In: **Proceedings of the going green-care innovation 2010 conference**. 2010. p. 8-11.
- DIAS, G. F. **Educação ambiental: princípios e práticas** – 8ª ed. São Paulo: Gaia, 2003.
- GERBASE, A. E.; OLIVEIRA, C. R. Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química. **Química Nova**, v. 35, p. 1486-1492, 2012.
- GOS, S.; RUBO, A. The relevance of alternative lixivants with regard to technical aspects, work safety and environmental safety. **Cyplus. Degussa AG, Hanau, Germany**, 2001.
- GOUVEIA, A. R. Recuperação de metais de placas de circuito impresso por via hidrometalúrgica. 2014.

GREEN ELETRON. **Green Eletron divulga pesquisa inédita sobre hábito e conhecimento dos brasileiros em relação ao lixo eletrônico.** Disponível em:

<https://greeneletron.org.br/blog/green-eletron-divulga-pesquisa-inedita-sobre-habito-e-conhecimento-dos-brasileiros-em-relacao-ao-lixo-eletronico/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GREEN ELETRON. **O que é Lixo Eletrônico?.** Disponível em:

<https://greeneletron.org.br/blog/o-que-e-o-lixo-eletronico/>. Acesso em: 22 mar. 2022.

GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil - 2021.** Disponível em:

https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf. Acesso em: 22 mar. 2022.

GREEN ELETRON. **Tudo o que você precisa saber sobre o lixo eletrônico.** Disponível em:

<https://greeneletron.org.br/blog/tudo-o-que-voce-precisa-saber-sobre-o-lixo-eletronico/>.

Acesso em: 14 mar. 2022.

HALL, W. J.; WILLIAMS, P. T. Separation and recovery of materials from scrap printed circuit boards. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 51, n. 3, p. 691-709, 2007.

HAYES, P. C. Process Principles in Minerals and Materials Production. **Hayes Publishing CO.** p. 29. Brisbane, Austrália, 1993.

HOCH, P. A. A obsolescência programada e os impactos ambientais causados pelo lixo eletrônico: o consumo sustentável e a educação ambiental como alternativas. **Seminário Nacional Demandas Sociais e Políticas Públicas na Sociedade Contemporânea**, 2016.

JADHAV, U.; HOCHENG, H. Hydrometallurgical recovery of metals from large printed circuit board pieces. **Scientific Reports**, v. 5, n. 1, p. 1-10, 2015.

LACERDA, L. Logística reversa: uma visão sobre os conceitos básicos e as práticas operacionais. **Rio de Janeiro: COPPEAD/UFRJ**, v. 6, 2002.

LAKSHMI, V. S.; SATYA, C. H. R.; ARAVIND, D. N. Electronic waste: overview, recycling and metal extraction methods. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, 2021. p. 012069.

LEGARTH, J. B. Environmental decision making for recycling options. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 19, n. 2, p. 109-135, 1997.

MADENOĞLU, H. Recovery of some metals from electronic scrap. **Ege Universitesi, Kimya Mühendisliği**, 2005.

MARTINE, G.; ALVES, J. E. D. Economia, sociedade e meio ambiente no século 21: tripé ou trilema da sustentabilidade?. **Revista Brasileira de Estudos de População**, v. 32, p. 433-460, 2015.

MECUCCI, A.; SCOTT, K. Leaching and electrochemical recovery of copper, lead and tin from scrap printed circuit boards. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**:

International Research in Process, Environmental & Clean Technology, v. 77, n. 4, p. 449-457, 2002.

MIRAGEM, B. Vício oculto, vida útil do produto e extensão da responsabilidade do fornecedor: comentários à decisão do Resp: 984.106/SC, do STJ. **Revista de direito do consumidor, São Paulo**, v. 85, n. 8, p. 325, 2013.

MURUGAN, R. V. *et al.* Milling and separation of the multi-component printed circuit board materials and the analysis of elutriation based on a single particle model. **Powder Technology**, v. 183, n. 2, p. 169-176, 2008.

NATUME, R. Y.; SANT'ANNA, F. S. P. Resíduos eletroeletrônicos: um desafio para o desenvolvimento sustentável e a nova lei da política nacional de resíduos sólidos. In: **3rd International Workshop on Advances in Cleaner Production. São Paulo**. 2011.

OH, C. J. *et al.* Selective leaching of valuable metals from waste printed circuit boards. **Journal of the Air & Waste Management Association**, v. 53, n. 7, p. 897-902, 2003.

PARK, Y. J.; FRAY, D. J. Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards. **Journal of Hazardous materials**, v. 164, n. 2-3, p. 1152-1158, 2009.

PORTILHO, F. **Sustentabilidade ambiental, consumo e cidadania**. Cortez, 2005.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **LEI Nº 12.305, DE 2 DE AGOSTO DE 2010**. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 14 mar. 2022.

QUINET, P.; PROOST, J.; VAN LIERDE, A. Recovery of precious metals from electronic scrap by hydrometallurgical processing routes. **Mining, Metallurgy & Exploration**, v. 22, n. 1, p. 17-22, 2005.

RAO, S.R., 2006. Recycling Metal. In: Rao, S.R. (Ed.), Waste Management Series, vol. 7 – **Resources Recovery and Recycling from Metallurgical Wastes**, Elsevier Science (Chapter 7).

SALVIATO, T. ESPECIAL: lixo eletrônico. **Tribunal Regional Federal da 1ª Região**, 2015. Disponível em: <https://portal.trf1.jus.br/portaltrf1/comunicacao-social/imprensa/noticias/especial-lixo-eletronico.htm>. Acesso em: 22 mar. 2022.

SILVA, B. D. *et al.* Resíduos eletroeletrônicos no Brasil. 2007.

SILVA, C. S. M. *et al.* PROCESSING OF A METAL CONCENTRATE FROM GROUND WASTE PRINTED CIRCUIT BOARDS IN ACIDIC MEDIA USING HYDROGEN PEROXIDE AS OXIDANT. **Química Nova**, v. 43, p. 914-922, 2020.

SZIGETHY, L.; ANTENOR, S. Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos. **Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada**, 2020. Disponível em: <https://www.ipea.gov.br/cts/en/topics/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios->

[tecnologicos-politicos-e-economicos](#). Acesso em: 28 mar. 2022.

TAVARES, D. H. R.; VIANA, N. C. R. T.; TAVARES, T. D. R. Reflexões sobre o problema ambiental do lixo eletrônico: qual a posição da legislação brasileira sobre o assunto. **Jus**, 2017. Disponível em: <https://jus.com.br/artigos/58876/reflexoes-sobre-o-problema-ambiental-do-lixo-eletronico-qual-a-posicao-da-legislacao-brasileira-sobre-o-assunto>. Acesso em: 28 de mar. 2022.

TUNCUK, A. *et al.* Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. **Minerals engineering**, v. 25, n. 1, p. 28-37, 2012.

VEIT, H. M. *et al.* Utilization of magnetic and electrostatic separation in the recycling of printed circuit boards scrap. **Waste management**, v. 25, n. 1, p. 67-74, 2005.

VEIT, H. M. Reciclagem de cobre de sucatas de placas de circuito impresso. 2005.

WILLIAMS, J.; SHU, L. H.; FENTON, R. G. Analysis of remanufacturer waste streams across product sectors. **CIRP Annals**, v. 50, n. 1, p. 101-104, 2001.

YAMANE, L. H. *et al.* Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. **Waste Management**, v. 31, n. 12, p. 2553-2558, 2011.

YAMANE, L. H. **Recuperação de metais de placas de circuito impresso de computadores obsoletos através de processo biohidrometalúrgico**. 2012. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.