



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
NÚCLEO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ANA PAULA DOS SANTOS SILVA

**MINERAÇÃO URBANA A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE
RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: um estudo de caso na cidade de Caruaru-PE**

Orientadora: Profª. Dra. Simone Machado Santos

Caruaru
2023

ANA PAULA DOS SANTOS SILVA

**MINERAÇÃO URBANA A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE
RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: um estudo de caso na cidade de Caruaru-PE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia ambiental com ênfase no tratamento de Resíduos Sólidos e Líquidos

Orientadora: Prof^a. Dra. Simone Machado Santos

Caruaru

2023

Mineração urbana a partir de placas de circuito impresso de resíduos eletroeletrônicos: um estudo de caso na cidade de Caruaru-PE

Urban mining from printed circuit boards of electronic waste: a case study in the city of Caruaru-PE

Ana Paula dos Santos Silva¹

RESUMO

Um dos mercados que mais crescem no mundo é o dos equipamentos eletroeletrônicos, devido principalmente à grande demanda e ao tempo de vida curto dos aparelhos. A pandemia do Covid-19 acentuou ainda mais esses números. Devido a isso, gera-se uma enorme quantidade de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). No Brasil, mais da metade dos resíduos produzidos são descartados incorretamente em aterros sanitários, enquanto boa parte do restante é descartada em aterros controlados ou lixões. Os REEE são constituídos basicamente de metais, polímeros e materiais cerâmicos. Dentre os metais os principais são o ferro, alumínio, paládio, ouro, prata, cobre e alguns metais tóxicos como chumbo, mercúrio e zinco. Uma das principais peças constituintes dos REEE são as placas de circuito impresso (PCI), nas quais se concentram a maior parte dos metais preciosos. A reciclagem das PCI é feita através de processamento mecânico, extração por processos metalúrgicos (pirometalurgia, hidrometalurgia, biometalurgia e eletrometalurgia) e refino. Os processos de mineração secundária gastam uma quantidade menor de energia do que a mineração primária. O Brasil não tem tecnologia suficiente para o tratamento das placas de circuito impresso, desse modo apenas a separação e moagem é feita em território nacional e o material resultante é enviado para tratamento em outros países. Através da mineração urbana, é possível fazer a extração dos metais com maior valor econômico e com a venda destes obter lucro. Um estudo foi realizado sobre o ganho econômico que se teria ao reciclar as placas de circuito impresso de REEEs da população dos bairros Universitário e Maurício de Nassau, na cidade de Caruaru-PE.

Palavras-chave: REEE; PCI; composição; metais; potencial econômico.

¹ Graduando em Engenharia Civil pela UFPE/CAA. E-mail: paula.ssilva@ufpe.br

ABSTRACT

One of the fastest-growing markets in the world is that of electro-electronic equipment, mainly due to high demand and the short lifespan of devices. The Covid-19 pandemic has further accentuated these numbers. As a result, a huge amount of electronic waste (WEEE) is generated. In Brazil, more than half of the waste produced is improperly disposed of in sanitary landfills, while most of the remaining portion is disposed of in controlled landfills or open dumps. WEEE is mainly composed of metals, polymers, and ceramic materials. The main metals present are iron, aluminum, palladium, gold, silver, copper, and some toxic metals such as lead, mercury, and zinc. One of the main components of WEEE is printed circuit boards (PCBs), which contain most of the precious metals. PCBs are recycled through mechanical processing, extraction by metallurgical processes (pyrometallurgy, hydrometallurgy, bioleaching and electrometallurgy) and refining. The secondary mining processes consume less energy than primary mining. Brazil does not have enough technology for the treatment of PCBs, so only separation and grinding are done on national territory and the resulting material is sent for treatment in other countries. Through urban mining, it is possible to extract metals with higher economic value, and with their sale, obtain profit. A study was conducted on the economic gain that would be obtained by recycling the printed circuit boards of WEEE from the population of the Universitário and Maurício de Nassau neighborhoods, in the city of Caruaru-PE.

Keywords: WEEE; PCB; composition; metals; economic potential.

DATA DE APROVAÇÃO: 12 de maio de 2023.

1 INTRODUÇÃO

A pandemia do COVID-19 trouxe mudanças na dinâmica de consumo de produtos e descarte de resíduos pelo mundo. Com a pandemia, houve uma centralização da geração de resíduos nas regiões residenciais. De acordo com o “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2021”, em 2020 foram geradas aproximadamente 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (1,07 kg/hab/dia) (ABRELPE, 2021). No Brasil, mais da metade dos resíduos produzidos são descartados em aterros sanitários, enquanto a parcela restante é descartada em aterros

controlados ou lixões (SCHNEIDER, 2016; ABRELPE, 2021).

A determinação prévia da vida útil do aparelho pelos fabricantes, induzindo ao consumismo, mesmo que o aparelho ainda funcione perfeitamente, é chamada de obsolescência programada (OLIVEIRA, 2020). A diminuição da vida útil, aliado ao surgimento de aparelhos eletroeletrônicos cada vez mais modernos, culminou no aumento do consumo desses produtos, consequentemente, no aumento do volume de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Com a restrição de circulação por causa da pandemia, muitas pessoas passaram a exercer suas atividades de forma remota (incluindo home office e estudo à distância), o que aumentou a dependência por produtos eletrônicos para realizar tais atividades.

Os REEE são compostos por não metais, como plásticos, vidro e cerâmica e por metais variados, os quais podem ser reciclados e/ou reutilizados. Um dispositivo fundamental nos equipamentos eletroeletrônicos é a placa de circuito impresso (PCI), que representa aproximadamente 6% da sua massa total (MEDEIROS, 2015). A composição das placas de circuito impresso varia muito de acordo com o tipo de equipamento estudado. Uma parcela significativa das PCI é composta por metais, desde cobre, alumínio, níquel, estanho, zinco e ferro, a metais valiosos, como ouro, prata, paládio e platina. Apresenta também uma parcela de metais pesados como chumbo, mercúrio berílio e arsênio (MORAES, 2011).

A melhor alternativa para tratamento dos REEE é a aplicação do conceito de mineração urbana, uma vez que auxilia na diminuição dos impactos negativos ao meio ambiente e contribui para a geração de renda. Em comparação à mineração primária, a recuperação de metais por mineração secundária demanda uma quantidade menor de energia.

As tecnologias empregadas no processo de reciclagem, podem ser de natureza mecânica, química ou térmica (TOZZI, 2017). A reciclagem inicia com a desmontagem dos componentes presentes, seguido pela separação manual dos resíduos úteis e dos materiais perigosos (DELFINI et al., 2011). A recuperação dos metais pode ser feita por processos mecânicos (separação manual, cominuição, peneiramento, separação magnética, eletrostática, dentre outros) e metalúrgicos como pirometalurgia, hidrometalurgia, biometalurgia e eletrometalurgia.

No Brasil, existem algumas empresas de reciclagem de equipamentos eletroeletrônicos (EEE). No entanto, esse tipo de reciclagem ainda é feito em uma escala muito pequena. Como o país não tem tecnologia suficiente para o devido tratamento, parte do REEE gerado é exportado para ser reciclado no exterior. Geralmente faz-se apenas a separação e moagem no Brasil, enquanto a placa de circuito impresso, que é o componente que contém a maior parte dos metais de maior valor econômico, é enviada para tratamento em outros países (SCHNEIDER, 2016).

Este trabalho tem como objetivo estudar a recuperação de materiais secundários presentes nas placas de circuito impresso de REEE produzidos no município de Caruaru-PE, identificar os materiais que compõem e que podem ser recuperados a partir das PCI e realizar um estudo econômico dos materiais que podem ser recuperados. Para isso, foram utilizados os dados levantados por OLIVEIRA NETO (2019), que apresenta um levantamento relativo ao consumo e desuso dos seguintes aparelhos: notebook, telefone celular, tablet, Tv LCD, Tv LED, Tv CRT, computador de mesa e impressora.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste estudo foi baseada em um levantamento de dados a partir de artigos científicos, livros, trabalhos de conclusão de curso, dissertações, teses e sites relacionados à mineração urbana, economia circular, resíduos sólidos, resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, reciclagem de metais e placa de circuito impresso. Em seguida as informações foram analisadas de modo a correlacionar os temas. Inicialmente foram definidas a mineração urbana e economia circular, seguidas da caracterização dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), sua definição, classificação e composição geral. Em seguida, pesquisados os métodos de extração e refino dos metais presentes nas placas de circuito impresso (PCI). Um levantamento semelhante foi feito para as PCIs, que é o componente do REEE que concentra a maior parte dos metais de alto valor comercial e que é o objeto principal de pesquisa deste trabalho, determinando a composição geral e específica para os equipamentos em estudo. Com base nisso, foi determinado o potencial econômico para alguns metais, em especial os preciosos (ouro, prata e cobre) e também ferro, alumínio, paládio, bismuto e antimônio.

2.1 Dados

Os dados utilizados foram colhidos no estudo de OLIVEIRA NETO (2019) e consiste num levantamento feito com uma amostra de 380 residências, por meio de um questionário acerca no número de REEE que possuíam os habitantes dos Bairros Universitário e Maurício de Nassau, localizados no município de Caruaru-PE. Os bairros delimitados são vizinhos, e abrangem uma população de classe média-alta. A maior parte dos participantes do estudo possuem renda mensal superior a 4 salários-mínimos. A Tabela 1 apresenta os dados de geração anual de REEE obtido por OLIVEIRA NETO (2019) para os bairros estudados.

Tabela 1 - Geração anual de REEE

EEE	Geração REEE (kg·ano ⁻¹)
Computador de mesa (monitor)	889,998
Computador de mesa (CPU)	593,332
Notebook	612,41
Impressora	583,8
Tablet	33,83
Telefone celular	68,2
TV CRT (tubão)	1205,28
TV LCD/Plasma	720
TV LED	271,4
Total	4978,25

Fonte: Oliveira Neto (2019)

O bairro Maurício de Nassau apresenta um total de 12.261 domicílios alocados principalmente em prédios residenciais, dispostos em uma área de cerca de 3,6 km². Já o bairro Universitário constitui uma área de aproximadamente de 3,12 km² e possui 8.420 domicílios de mesma natureza (CARUARU, 2017). Dadas as características dos mesmos, pode-se deduzir que o consumo e descarte de equipamentos eletroeletrônicos seja alto.

2.2 Determinação do potencial econômico

Os equipamentos eletroeletrônicos analisados incluem notebook, telefone celular, tablet, tv LCD, tv LED, tv CRT, computador de mesa (monitor e CPU) e impressora. Foi feito um levantamento da composição metálica de cada aparelho e determinada também a composição gravimétrica média de cada metal das placas de circuito impresso dos mesmos. Para a obtenção dos resultados foram utilizadas as porcentagens em massa das PCIs em relação a cada um dos equipamentos eletroeletrônicos apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Porcentagens em massa das PCIs

EEE	Massa (%)
Computador de mesa (monitor)	12
Computador de mesa (CPU)	14
Notebook	15
Impressora	3
Tablet	10
Telefone celular	10
TV CRT (tubão)	10
TV LCD/Plasma	7
TV LED	2

Fonte: Babbitt et al. (2017)

Por fim, foram analisados trabalhos sobre mineração secundária, a fim de determinar o potencial econômico dos metais presentes nas placas de circuito impresso. Para o processamento das PCI podem ser utilizados vários métodos, o presente trabalho se limitou a estudar o processamento por meio de processos mecânicos e tratamentos metalúrgicos (pirometalurgia, eletrometalurgia, hidrometalurgia, biometalurgia). As taxas de recuperação dependem do método adotado ou da combinação dos mesmos. Foi adotada uma taxa de recuperação de 100%.

Os valores de venda dos metais selecionados para determinação do potencial econômico foram tomados por base do *The Global E-waste Monitor 2020 Quantities, flows, and the circular economy potential* de FORTI et al (2020), em milhares de dólares americanos, conforme mostrado na Tabela 3. Nos resultados, esses números foram convertidos para real e foi necessária também uma regra de três simples para obter os valores por quilograma dos metais de interesse.

Tabela 3 - Valor dos metais em milhões de dólares

Elemento	kt	$10^6 \$$
Ferro (Fe)	20466	24645
Cobre (Cu)	1808	10960
Prata (Ag)	1.2	579
Ouro (Au)	0.2	9481
Paládio (Pd)	0.1	3532
Alumínio (Al)	3046	6062
Bismuto (Bi)	0.1	1.3
Antimônio (Sb)	76	644

Fonte: FORTI (2020)

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Mineração urbana

A mineração tradicional é a extração de metais de jazidas naturais no subsolo terrestre. Em contrapartida, a mineração urbana refere-se ao aproveitamento de minerais como matéria prima para fins econômicos a partir de fontes secundárias, reduzindo os impactos ambientais causados pela mineração convencional obtida de matérias primas não renováveis (XAVIER e LINS, 2018).

Neste sentido, designa à reutilização de minerais de quaisquer fontes geradas pelo homem, desde resíduos industriais, de construção civil e produtos diversos, incluindo os equipamentos

eletroeletrônicos (COSSU e WILLIAMS, 2015). Os materiais obtidos dessa forma têm o mesmo nível de qualidade daqueles obtidos das jazidas naturais (GREENELETRON, 2019).

A economia circular é um conceito que estabelece que produtos e materiais tenham sua vida útil prolongada ou que sejam reinseridos na cadeia produtiva (GIESE et al, 2021). A mineração urbana é considerada uma ferramenta de economia circular, para os casos em que não é possível a reciclagem ou o reparo do produto apresentando-se como uma alternativa que garante maior sustentabilidade do que a mineração primária (ESPINOZA et al, 2020). Uma mina urbana é constituída de materiais obtidos em áreas urbanas a partir de produtos e materiais que já foram consumidos. Os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são entendidos como minas urbanas, uma vez que possuem várias matérias primas e metais valiosos (GIESE et al, 2021).

3.2 Resíduos de equipamentos eletroeletrônicos

Os aparelhos eletroeletrônicos que foram descartados sem a intenção de reutilização são chamados de resíduo de equipamento eletroeletrônico (REEE), mesmo que ainda funcione corretamente. Pilhas e baterias, aparelho celular, televisores, lâmpadas, notebooks, computadores e periféricos associados, como monitor, mouse, teclado, modens, câmeras e impressora, e eletrodomésticos descartados são exemplos de REEE.

A Comunidade Europeia classifica os REEE em 10 categorias, conforme mostra a Tabela 4:

Tabela 4 - Classificação dos REEE de acordo com a Comunidade Europeia

Categoria	Exemplos de Equipamentos
1 - Grandes eletrodomésticos	Refrigeradores, máquinas de lavar roupa, fogões, aparelhos de ar condicionado, etc.
2 - Pequenos eletrodomésticos	Aspiradores, torradeiras, fritadeiras, balanças, relógios de pulso, etc.
3 - Equipamentos de informática e de telecomunicações	Computadores, telefones, celulares, calculadoras de bolso, impressoras, etc.
4 - Equipamentos de consumo e painéis fotovoltaicos	Instrumentos musicais, câmeras de vídeo, aparelhos de rádio e TV, painéis fotovoltaicos, etc.
5 - Equipamentos de iluminação	Lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de sódio de baixa pressão, etc.
6 - Ferramentas elétricas e eletrônicas (com exceção de ferramentas industriais fixas de grandes dimensões)	Máquinas de costura, furadeiras, parafusadeiras, serras, etc.
7 - Brinquedos e equipamento de desporto e lazer	Vídeo games, caça-níqueis, equipamentos para esporte com componentes elétricos ou eletrônicos, etc.
8 - Aparelhos médicos (com exceção de todos os produtos implantados e infetados)	Equipamentos de radioterapia, cardiologia, diálise, ventiladores pulmonares, etc.

9 - Instrumentos de monitoramento e controle	Detector de fumaça, termostato, regulador de aquecimento, etc
10 - Distribuidores automáticos	Distribuidores automáticos de bebidas quentes, garrugas, dinheiro, etc.

Fonte: EU (2012)

O *The Global E-Waste Monitor*, criado pela UNU – Universidade das Nações Unidas, reúne dados anuais de geração e reciclagem de lixo eletrônico. Os últimos dados publicados foram em relação a 2019, onde foi gerado um volume de 53,6 Mt de REEE no mundo, dos quais apenas 17%, aproximadamente, foram devidamente reciclados. Estima-se que em 2030 este número cresça para 74,7 Mt (Forti et al 2020). Segundo o monitor da UNU, o volume de resíduos eletroeletrônicos gerados no Brasil em 2019 foi de 2,143 Mt, o que equivale a 10,2 kg per capita. Em contrapartida, 2,792 Mt de equipamentos novos foram colocados no mercado.

No Brasil, os resíduos eletroeletrônicos são tratados pela Lei PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos, lei nº 12.305/10, a qual versa que os responsáveis pelos EEE (comerciantes, fabricantes, distribuidores e importadores) devem implementar sistemas de logística reversa. Este ponto é tratado mais detalhadamente no Decreto nº 10.240/2020. Ambos enfatizam a importância da reutilização e reciclagem de resíduos sólidos de todos os tipos.

O ferro, cobre e alumínio, por serem facilmente removidos, são reciclados em território nacional. No entanto, como o Brasil não tem tecnologia suficiente para realizar todas as etapas da reciclagem, a maioria das empresas, cerca de 89%, realiza apenas as fases de triagem e desmonte, enviando para países estrangeiros os constituintes de reciclagem mais complexa após serem triturados. Estes por sua vez, contêm os metais de maior valor econômico como ouro e prata. A maior parte das empresas brasileiras de reciclagem de *e-waste* encontram-se nas regiões Sudeste e Sul (DIAS et al, 2017).

3.2.1 Impactos dos REEE

Os REEE são compostos principalmente por metais e em segundo lugar por plásticos (XAVIER e LINS, 2018). Apresenta ainda uma parcela de materiais tóxicos, como por exemplo, mercúrio, cádmio, chumbo, cromo, clorofluorcarbonos (CFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs) e retardadores de chama bromados (BFR) (WIDMER et al., 2005; FORTI et al, 2020).

Os materiais perigosos presentes nos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos são nocivos à saúde humana podendo atingir pulmões, rins e fígado e até mesmo causar câncer. É danoso

também ao meio ambiente, contaminando as águas, o solo e o ar (MEDEIROS, 2015; CALDAS et al, 2019). Infere-se que aproximadamente 70% dos metais pesados, em locais destinados à disposição final de lixo em geral, são decorrentes do descarte incorreto de equipamentos eletrônicos (CETEM, 2010).

As contaminações ocorrem principalmente quando são tratados em países de baixa e média renda, nos quais as taxas de coleta geralmente são baixas ou até mesmo inexistentes. A geração de minerais secundários provenientes do lixo eletrônico, estimula a diminuição da extração de metais de fontes virgens. Isto implica na redução do lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera, o que ajuda a não agravar o aquecimento global (FORTI et al 2020).

No Brasil, a aquisição ilegal dos REEE aliado à reciclagem clandestina realizada por empresas não licenciadas, expõe os trabalhadores aos materiais tóxicos presentes, pois nem sempre são disponibilizados os equipamentos de proteção individual (EPIs) necessários (DIAS et al, 2018).

Os EEE que não apresentam mais utilidade podem ser reutilizados, através da conceção do mesmo para outrem, remanufaturados, onde são reformados através do desmonte e reparo de componentes defeituosos deixando-os aptos novamente para o uso, ou podem ser reciclados, onde são reprocessados para recuperação de materiais. O descarte em aterro ou a incineração não é recomendada devido aos metais perigosos (ROVEN, 2011).

Na reciclagem primeiramente é feito um pré-processamento, onde são aplicados processos mecânicos aos REEE para a recuperação de metais, iniciando pelo desmonte da peça, que pode ser manual ou automatizado, seguido pela Trituração e moagem. Ademais é realizado o refino através de processos térmicos, químicos ou biológicos. O principal objetivo do tratamento, é a extração de metais preciosos, uma vez que apresentam maior valor de revenda, além de garantir uma destinação mais segura para os componentes tóxicos (ROVEN, 2011; DOMINGUES e SOUZA, 2021).

A mineração primária de metais, consome cerca de 7 a 8% da energia consumida no mundo (UNEP, 2013). Através da mineração urbana seria possível obter uma economia de energia superior a 60% para a maioria dos componentes do REEE sendo, portanto, um meio mais sustentável (MEDEIROS, 2015). A Tabela 5 mostra o comparativo entre o consumo de energia e água dos processos de obtenção de alguns metais através da mineração primária e pela mineração secundária.

Tabela 5 - Consumo de energia e uso de água na mineração tradicional e na mineração urbana

Metais	Mineração Tradicional		Mineração Urbana	
	Energia (MJ·kg ⁻¹)	Água (m ³ ·t ⁻¹)	Energia (MJ·kg ⁻¹)	Água (m ³ ·t ⁻¹)
Cu	31-2.040	40-200	14	15
Al	238-925	11-320	10	2
Au	13.300-52.300	120.000-420.000	140-230	30
Ag	480-4.280	60-200	80-180	20-40
Terras-raras	5.500 - 7.200	1.275 - 1.800	1.000 - 5.000	250 - 1.250

Fonte: Xavier e Lins (2018)

A extração de materiais como ouro, cobre e ferro da sucata gerada no mundo em 2019, através de processos de mineração secundária, seria suficiente para gerar um montante de cerca de 57 bilhões de dólares (FORTI et al 2020).

3.3 Placas de circuito impresso (PCI)

Um dos componentes de maior interesse dos REEE, são as Placas de Circuito Impresso (PCI), que é a base em que se interligam os resistores, capacitores, diodos, transistores, etc. Elas representam uma média de 6% da massa total do equipamento (SILVA, 2019). Um exemplo pode ser visto na Figura 1:

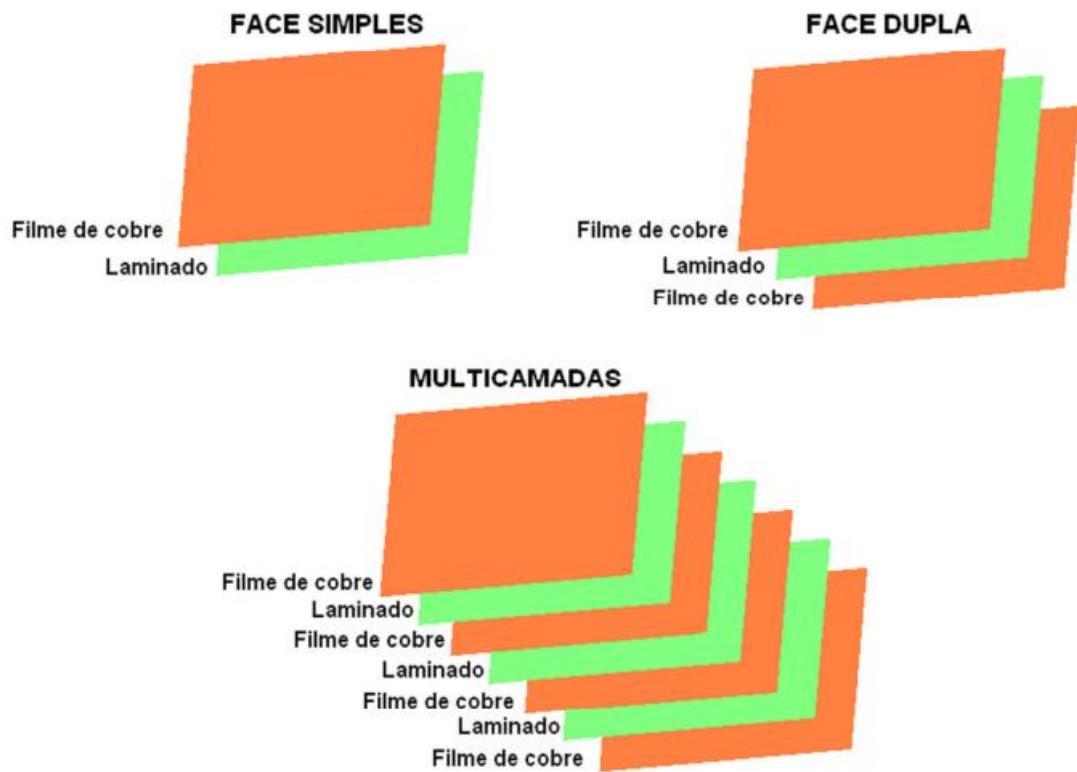
Figura 1 - Placa de Circuito Impresso de computador Obsoleto

Fonte: Ferreira (2017)

As placas de circuito impresso são montadas utilizando um substrato de material não condutor, geralmente de papel reforçado com resina fenólica ou fibra de vidro reforçada com resina époxi, a ele são aplicadas substâncias tóxicas como os retardadores de chama, por

exemplo (BIZZO et al, 2014). Acima do laminado é colocada uma película de cobre, a qual possui caminhos que permitem a interconexão entre os componentes que são acoplados à placa (OLIVEIRA, 2009). Ao substrato se conectam capacitores, resistores, conectores, pinos dentre outros componentes. (VERMESAN et al, 2019). Essas placas podem ser de uma, duas ou de múltiplas camadas, contendo entre 1 a 16 filmes de cobre intercalados na placa isolante (SILVA, 2019; OLIVEIRA, 2009), como se pode ver na Figura 2:

Figura 2 - Esquema de classificação das Placas de Circuito Impresso



Fonte: Moraes (2011)

O principal componente das PCI são os metais, constituindo uma parcela de 40%, seguido pelos polímeros e cerâmicas, com 30% cada, da sua massa. Dentre os metais, os principais são ferro, cobre, alumínio, platina, paládio, ouro, prata, além de uma fração de metais tóxicos como zinco, chumbo e mercúrio. No entanto, como não são homogêneas, a composição é variável, as PCI de aparelhos celulares, por exemplo, podem representar até cerca de 21,30% da sua massa. (MEDEIROS, 2015; CALDAS et al, 2018). A tendência é que essas placas sejam fabricadas com cada vez menos material. A Tabela 6 apresenta a composição de alguns metais presentes nas PCI dos equipamentos estudados.

Tabela 6 - Composição gravimétrica de metais presentes nas PCI dos equipamentos estudados (%)

EEE	Computador de mesa		Notebook	Impressora	Tablet	Telefone celular	TV CRT (tubão)	TV LCD/Plasma	TV LED
	Monitor	CPU							
Ferro (Fe)	3,400	1,300	3,700	14,100	3,700	1,800	3,400	6,930	6,930
Cobre (Cu)	7,200	20,000	19,000	20,000	19,000	33,000	7,200	17,250	17,250
Prata (Ag)	0,080	0,100	0,100	0,170	0,100	0,400	0,080	0,080	0,080
Ouro (Au)	0,010	-	0,100	0,040	0,100	0,200	0,010	0,010	0,010
Paládio (Pd)	0,002	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,002	0,002	0,002
Alumínio (Al)	6,200	1,800	1,800	3,380	1,800	1,500	6,200	10,050	10,050
Berílio (Be)	-	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	-	-	-
Bismuto (Bi)	0,030	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,030	0,030	0,030
Cromo (Cr)	0,020	-	0,100	0,540	0,100	0,100	0,020	0,020	0,020
Estanho (Sn)	0,180	8,300	1,600	0,690	1,600	3,500	0,180	0,730	0,730
Zinco (Zn)	5,300	1,700	1,600	1,350	1,600	0,500	5,300	1,170	1,170
Antimônio (Sb)	0,160	0,300	0,100	0,130	0,100	0,100	0,160	0,160	0,160
Bromo (Br)	0,390	0,820	0,820	0,820	0,820	0,820	0,390	0,390	0,390
Cloro (Cl)	0,310	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,310	0,310	0,310
Chumbo (Pb)	1,400	2,100	1,000	0,790	1,000	1,300	1,400	1,090	1,090
Níquel (Ni)	0,260	1,130	1,130	1,130	1,130	1,130	0,260	0,260	0,260

Fonte: Adaptado de Cuchiella et al. (2016)

3.3.1 Tecnologias para a reciclagem e recuperação dos metais

O processo de reciclagem das PCI consiste na desmontagem para separação dos elementos constituintes, beneficiamento para concentração dos materiais e refinamento para extração dos metais com maior pureza (MEDEIROS, 2015). A separação dos metais e dos plásticos pode ser feita por processos químicos, mecânicos ou térmicos. Inicialmente é feito o desmonte manual dos componentes e em seguida a separação dos produtos em classificando-os em úteis ou perigosos (DELFINI et al., 2011). Após os processos de separação e classificação é realizado o refino, através de metodologias específicas (CHARVÁTOVÁ et al, 2010; VERMESAN et al, 2019). Os principais métodos são o processamento mecânico, processos pirometalúrgicos, hidrometalúrgicos, biometalúrgicos e eletrometalúrgicos.

As PCIs são removidas dos equipamentos e, por serem componentes de maior complexidade, são tratadas em países estrangeiros, pois o Brasil não tem a tecnologia necessária (DIAS et al, 2018). O refino dos metais é feito em países como Canadá, Alemanha, Japão, Suécia e Bélgica, onde está localizada a sede da Umicore (SCHLUEP, 2009). A Umicore é uma empresa global de tecnologia e reciclagem de materiais, a qual é responsável pelo processamento de 300.000

toneladas de metais preciosos e outros materiais provenientes de todo o mundo (UMICORE, s.d.).

Algumas das tecnologias utilizadas causam danos ao meio ambiente, como a pirometalurgia e a hidrometalurgia, por exemplo, que liberam gases tóxicos e efluentes ácidos e alcalinos em grande volume, respectivamente, sendo mais danosa a pirometalurgia. A biometalurgia é uma alternativa mais ecológica, na qual são usados microrganismos para a lixiviação. A eletrometalurgia pode ser usada para recuperação dos metais e também como meio de refinamento final para os outros processos citados. Os processos mecânicos na maioria das vezes são usados como um pré-tratamento, uma vez que de todos os métodos é o que apresenta a menor taxa de recuperação.

3.3.1.1 Processamento mecânico

Os resíduos coletados passam por um pré-tratamento, através de processos mecânicos para separar os metais das partes não metálicas, como plásticos e compostos cerâmicos (WU et al, 2017; PRIYA E HAIT, 2017). Nesta etapa, os materiais perigosos e de maior valor agregado são separados e os componentes maiores, retirados. (CUI e ZHANG, 2008).

Após o desmonte, os resíduos têm o seu tamanho reduzido através da cominuição (MATA, 2014). Na fragmentação ocorre primeiramente a britagem utilizando britadores giratórios ou de mandíbula e depois é feita a moagem, para a obtenção de partículas menores, o que pode ser feito com moinhos de martelos (Shredder) e de facas (GERBASE e OLIVEIRA, 2012).

Ademais, ocorre a separação das partículas de acordo com sua granulometria ou densidade, ou ainda de acordo com suas propriedades eletromagnéticas, como separação magnética e eletrostática, por exemplo (VEIT 2001; YU et al., 2009). A separação das partículas pode ser feita utilizando-se peneiras vibratórias, estáticas e rotativas, ou por classificadores mecânicos e ciclones (GERBASE e OLIVEIRA, 2012).

A separação magnética é feita através da diferença de comportamento entre os materiais na presença de um campo magnético. Estes, de acordo com sua susceptibilidade magnética, podem ser classificados em ferromagnéticos e paramagnéticos, os quais são fortemente e fracamente atraídos pelo campo magnético, respectivamente, ou diamagnéticos quando são repelidos (LUZ et al, 2010).

Na separação eletrostática, os constituintes são separados por meio da polarização dos corpos na presença de um campo elétrico (SANTANA et al, 2016). Um dos métodos de eletrização das partículas, empregado para a separação entre os materiais condutores e não condutores é o

bombardeamento de íons, o que pode ser feito com um separador eletrostático por efeito corona (SILVEIRA, 2016).

Os custos de operação do tratamento mecânico são baixos, entretanto, as perdas, principalmente de metais preciosos, são significativas, apresentando uma taxa de cerca de 10% a 35% para metais preciosos, podendo chegar a 70% para o ouro e 80% para o paládio (TUNCUK et al., 2012; MARRA et al, 2018).

3.3.1.2 Pirometalurgia

Nos processos pirometalúrgicos a recuperação dos metais é feita sob altas temperaturas e consequentemente demanda um elevado consumo energético para que essas temperaturas sejam atingidas (OLIVEIRA, 2010).

Na pirometalurgia ocorre a separação de uma fase contendo os metais e outra de escória, a qual concentra os materiais cerâmicos. Neste processo, os polímeros são degradados termicamente (FRANCO e BARROS, 2016). Fundição, incineração, derretimento, sinterização e reações gasosas a altas temperaturas são exemplos inclusos nestes processos (GUPTA et al 2022).

Após a extração dos metais, devem ser aplicados processos hidrometalúrgicos ou eletrometalúrgicos para se alcançar de maiores níveis de pureza (CUI e ZHANG, 2008).

3.3.1.3 Hidrometalurgia

A lixiviação é a primeira fase do processo hidrometalúrgico, na qual ocorre a dissolução do material, com o objetivo de viabilizar a retirada dos metais e transportá-los para a solução líquida, que pode ser alcalina ou ácida (CUI e ZHANG, 2008). Podem ser utilizados ácido nítrico, ácido fluorobórico, ácido sulfúrico, água régia, dentre outros lixiviantes para solubilizar os metais. Em seguida podem ser utilizadas técnicas de extração por solventes, troca de íons, cementação e adsorção por carvão ativado para a separação dos íons metálicos presentes nessa fase aquosa (FRANCO e BARROS, 2016).

A hidrometalurgia possui altos índices de recuperação de metais, além de ser um meio mais econômico e apresentar menor impacto ambiental que os processos pirometalúrgicos. É mais fácil de ser controlado e tem uma maior precisão (TUNCUK et al., 2012; GUPTA, 2022). No entanto, os lixiviantes utilizados apresentam propriedades corrosivas e venenosas (BERNARDES, 2009).

No fim, os metais são então isolados e submetidos a processamentos eletrolíticos, redução química ou cristalização para a recuperação dos metais (SILVA, 2018).

3.3.1.4 Biometalurgia

Nos processos biometalúrgicos (ou biohidrometalúrgicos) ocorre a extração dos metais a partir da ação de microrganismos para a recuperação de metais valiosos, como o ouro, cobre e cobalto (MATA, 2014).

A biolixiviação microbiana se utiliza de alguns fungos e bactérias heterotróficas e autotróficas para solubilizar os metais presentes nas PCIs tornando possível sua extração. É especialmente eficaz na extração de ouro, cobre e urânio (KRISHNAMOORTHY, 2020). Na biolixiviação a principal bactéria usada para transportar os metais para a fase líquida, é a *Thiobacillus ferrooxidans* (BABA, 2014).

Quando comparada a outros métodos de extração de metais a biometalurgia apresenta-se como um meio mais econômico, tanto em relação ao capital inicial quanto aos custos de operação, além de ser ambientalmente menos prejudicial, demandando uma menor quantidade de energia quando comparado à extração por pirometalurgia, por exemplo (GARCIA JUNIOR e BEVILAQUA, 2008).

3.3.1.5 Eletrometalurgia

A eletrometalurgia tem como fundamento a recuperação de metais por meio da eletrólise (OLIVEIRA e GERBASE, 2012; BERNARDES, 2009). Isto ocorre por meio de reações não espontâneas de oxirredução. Neste processo, o metal é dissolvido na solução eletrolítica e em seguida o metal puro é depositado no cátodo (VIVAS, 2014). Neste processo, a eletricidade é utilizada como fonte de calor ou como agente de redução química, para a extração e refino dos metais (OLIVEIRA e GERBASE, 2012; BERNARDES, 2009).

Na eletro-obtenção, os metais são recuperados em solução aquosa por meio de uma reação eletroquímica. Para isso, são necessários dois eletrodos imersos: um cátodo, sobre o qual ocorre a eletrodeposição dos íons do metal desejado, e um ânodo condutor inerte. Já no eletrorrefino, um cátodo de pureza elevada é produzido a partir da dissolução de um ânodo metálico impuro (FRANCO e BARROS, 2016; MEDEIROS, 2015).

Os processos eletrometalúrgicos geralmente são empregados no final do processo de reciclagem, após os outros métodos já citados, para obtenção de maiores taxas de pureza (MARRA, 2018).

4 RESULTADOS

Cada aparelho eletroeletrônico contém uma placa de circuito impresso diferente, o que varia também para o mesmo tipo de equipamento de acordo com o modelo e a marca. O computador de mesa pode possuir mais de uma placa (placa mãe, placa de vídeo, placa de som, placa de rede etc). A massa representativa média das PCIs, para a geração anual apresentada na Tabela 1 da Metodologia, é mostrada na Tabela 7. Os números foram obtidos pelo produto dos valores da Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 7 - Massa representativa das PCIs por equipamento

EEE	PCI (kg)
Computador de mesa (monitor)	106,79976
Computador de mesa (CPU)	83,06648
Notebook	91,8615
Impressora	17,514
Tablet	3,383
Telefone celular	6,82
TV CRT (tubão)	120,528
TV LCD/Plasma	50,4
TV LED	5,428
Total	485,80074

Fonte: A autora (2023)

A partir dos dados das Tabelas 6 e 7 foi encontrada a massa total de cada metal por equipamento em estudo, o que é mostrado na Tabela 8.

Tabela 8 – Massa de resíduos das PCIs para cada REEE (kg)

EEE	Computador de mesa				
	Monitor	CPU	Notebook	Impressora	Tablet
Ferro (Fe)	3,631192	1,079864	3,398876	2,469474	0,125171
Cobre (Cu)	7,689583	16,613296	17,453685	3,502800	0,642770
Prata (Ag)	0,085440	0,083066	0,091862	0,029774	0,003383
Ouro (Au)	0,010680	-	0,091862	0,007006	0,003383
Paládio (Pd)	0,002136	0,008307	0,009186	0,001751	0,000338
Alumínio (Al)	6,621585	1,495197	1,653507	0,591973	0,060894

Berílio (Be)	-	0,001661	0,001837	0,000350	0,000068
Bismuto (Bi)	0,032040	0,016613	0,018372	0,003503	0,000677
Cromo (Cr)	0,021360	-	0,091862	0,094576	0,003383
Estanho (Sn)	0,192240	6,894518	1,469784	0,120847	0,054128
Zinco (Zn)	5,660387	1,412130	1,469784	0,236439	0,054128
Antimônio (Sb)	0,170880	0,249199	0,091862	0,022768	0,003383
Bromo (Br)	0,416519	0,681145	0,753264	0,143615	0,027741
Cloro (Cl)	0,331079	0,008307	0,009186	0,001751	0,000338
Chumbo (Pb)	1,495197	1,744396	0,918615	0,138361	0,033830
Níquel (Ni)	0,277679	0,938651	1,038035	0,197908	0,038228

Fonte: A autora (2023)

Tabela 8 - (Continuação) Composição gravimétrica das PCI para cada REEE

EEE	Telefone celular	TV CRT (tubão)	TV LCD/Plasma	TV LED
Ferro (Fe)	0,122760	4,097952	3,492720	0,376160
Cobre (Cu)	2,250600	8,678016	8,694000	0,936330
Prata (Ag)	0,027280	0,096422	0,040320	0,004342
Ouro (Au)	0,013640	0,012053	0,005040	0,000543
Paládio (Pd)	0,000682	0,002411	0,001008	0,000109
Alumínio (Al)	0,102300	7,472736	5,065200	0,545514
Berílio (Be)	0,000136	-	-	-
Bismuto (Bi)	0,001364	0,036158	0,015120	0,001628
Cromo (Cr)	0,006820	0,024106	0,010080	0,001086
Estanho (Sn)	0,238700	0,216950	0,367920	0,039624
Zinco (Zn)	0,034100	6,387984	0,589680	0,063508
Antimônio (Sb)	0,006820	0,192845	0,080640	0,008685
Bromo (Br)	0,055924	0,470059	0,196560	0,021169
Cloro (Cl)	0,000682	0,373637	0,156240	0,016827
Chumbo (Pb)	0,088660	1,687392	0,549360	0,059165
Níquel (Ni)	0,077066	0,313373	0,131040	0,014113

Fonte: A autora (2023)

Tomando a porcentagem da massa de cada metal das PCIs e também a fração representativa da placa em relação a cada aparelho, é possível calcular os ganhos potenciais que se obteriam com a reciclagem completa das placas de circuito impresso que compõem os resíduos de equipamentos eletroeletrônicos levantados nos bairros Maurício de Nassau e Universitário na cidade de Caruaru-PE. O potencial econômico é apresentado na Tabela 9.

Tabela 9. Potencial econômico com a reciclagem das PCI.

Elemento	Valor (\$)	Valor (R\$)
Ferro (Fe)	22,63179393	118,8169181
Cobre (Cu)	402,8835364	2115,138566
Prata (Ag)	222,8616297	1170,023556
Ouro (Au)	6836,070071	35889,36787
Paládio (Pd)	915,7632982	4807,757316

Alumínio (Al)	46,98528822	246,6727632
Bismuto (Bi)	1,631184412	8,563718163
Antimônio (Sb)	7,008426227	36,79423769
Total	8455,835228	44393,13495

Fonte: A autora (2023)

Os metais preciosos presentes nas placas de circuito impresso levantadas por OLIVEIRA NETO (2019) podem ser extraídos por meio dos processos de mineração secundária já apresentados. Através do resultado deste estudo, o preço de revenda dos metais secundários seria de R\$ 44393,14, considerando uma taxa de recuperação de 100%. No entanto, os processos de recuperação não garantem a obtenção total dos metais presentes nas PCIs. As taxas de perda variam conforme o processo escolhido ou combinação dos mesmos.

Estima-se que haja uma geração entre 20 e 50 milhões de toneladas de lixo eletrônico mundialmente a cada ano sendo que somente 20% são submetidos a processos de reciclagem (OLIVEIRA, 2012; XAVIER e LINS, 2018). Se toda essa massa de resíduos fosse tratada por órgãos devidamente regularizados, de preferência por métodos menos agressivos ao meio ambiente, como os processos biometalúrgicos, seria possível reduzir os impactos ambientais, diminuir a dependência da extração primária de minérios, reduzir o preço dos metais na indústria e alcançar grande ganho econômico.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O crescente consumo de equipamentos eletroeletrônicos gerou nos últimos anos um aumento nos resíduos de mesma natureza, conhecidos como REEE. As placas de circuito impresso são os componentes mais complexos dos equipamentos eletroeletrônicos, as quais concentram a maior parte dos metais de alto valor econômico. Por esse motivo é de fundamental importância elevar as taxas de reciclagem dos REEE, em especial das PCI. Sobretudo em países subdesenvolvidos, os quais apresentam taxas mais elevadas de mineração secundária clandestina. Essa reciclagem não regularizada expõe os trabalhadores aos perigos associados aos metais pesados e contamina o meio ambiente.

No processo de reciclagem ocorrem perdas dos metais, relacionadas à reciclagem clandestina feitas por mão de obra não especializada e também perdas intrínsecas aos próprios processos de extração adotados. Cada método tem um percentual de perda associado, diferente para cada metal. As técnicas devem ser adotadas dependendo dos recursos que se possui e do nível de pureza requerido nos futuros usos do metal, e também de acordo com o impacto

ambiental que pode causar, o qual deve ser sempre o mínimo possível. Dentre os métodos estudados o que apresenta um menor dano à natureza com altas taxas de recuperação são os processos biometalúrgicos.

Com os resultados deste estudo seria possível um ganho econômico de R\$ 44.393,14, considerando uma taxa de recuperação de 100%. Além deste ganho, a reciclagem dos resíduos estudados também propicia a geração de empregos e a diminuição da demanda por minérios de jazidas naturais, o que é mais barato e sustentável. As taxas de crescimento da geração de REEE devem ser continuamente monitoradas para auxiliar na tomada de decisões para seu gerenciamento. Faz-se necessário também o registro das empresas recicadoras no Brasil, e a devida fiscalização das mesmas.

REFERÊNCIAS

ABRELPE. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** 2021. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 10 de nov. 2022.

BABA, A. A.; IBRAHIM1, L.; ADEKOLA, F. A.; BALE, R. B.; GHOSH, M. K.; SHEIK, A. R.; PRADHAN, S. R.; AYANDA, O. S. FOLORUNSHO, I. O. **Hydrometallurgical Processing of Manganese Ores: A Review.** Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering, 2014.

BABBITT, C.; ALTHAF, S.; CHEN, R.. **Sustainable materials management for the evolving consumer technology ecosystem.** Summary report of phase, 2017.

BALDÉ, C.P.; FORTI V.; GRAY, V.; KUEHR, R.; STEGMANN, P. **The Global E-waste Monitor – 2017.** United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna, 2017.

BERNARDES, I. P. T. P. **Reciclagem de placas de circuitos electrónicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa. 2009.

BIZZO, W.; FIGUEIREDO, R. A.; ANDRADE, V. F. **Characterization of Printed Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical Separation.** Materials. 2014.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020.** Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Diário Oficial da União, 12 de fev. de 2020.

CALDAS, M; LOUREIRO, B; SILVAS, F; MORAES, V; TENÁRIO, J; ESPINOSA, D. **Placas de circuito impresso: caracterização e valor agregado.** Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração, São Paulo, 2019.

CHARVÁTOVÁ, H.; JANÁČOVÁ, D.; MIOSLAV, F.; KOLOMAZNÍK, K. **Mass analysis of the components separated from printed circuit boards.** Acta Montanistica Slovaca, 2010. COSSU, R.; WILLIAMS, I.D. **Urban mining: Concepts, terminology, challenges.** Waste Management, 2015.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; KOH, L.; ROSA, P. **A profitability assessment of European recycling processes treating printed circuit boards from waste electrical and electronic equipments.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016.

CUI, J.; ZHANG, L. **Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review.** Journal of Hazardous Materials, 2008.

CARUARU. **Relatório quantitativo de imóveis por bairro.** Prefeitura Municipal de Caruaru, Secretaria da Fazenda, 2017.

DELFINI, M; FERRINI, M; MANNI, A; MASSACCI, P; PIGA, L; SCOPPETTUOLO, A. **Optimization of Precious Metal Recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment Boards.** Journal of Environmental Protection. 2011.

DIAS, P.; MACHADO, A.; HUDA, N.; BERNARDES, A. M. **Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: A study on the Brazilian recycling routes.** Journal of Cleaner Production, 2017.

DOMINGUES, A.; SOUZA, R. **Recuperação de metais de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE): estado da arte, benefícios e desafios para a Economia Circular.** Foz do Iguaçu, Paraná, 2021.

ESPINOZA, L. T.; ROSTEK, L.; LOIBL, A.; STIJEPIĆ, D. **The promise and limits of Urban Mining Potentials, Trade-Offs and Supporting Factors for the Recovery of Raw Materials from the Anthroposphere.** Fraunhofer-Institut Für System- Und Innovationsforschung ISI, 2020.

UE. Diretiva 2012/19/UE do Parlamento Europeu e do Conselho de 4 de julho de 2012. Relativa aos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos (REEE). Jornal Oficial da União Europeia, 2012. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>>. Acesso em: 05 de nov. 2022.

FERREIRA, Marco Rafael Venâncio. **Reciclagem de placas de circuito impresso: uma alternativa de desmantelamento. Mestrado integrado em engenharia do ambiente.** Dissertação (Engenharia do Ambiente) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 2017.

FORTI, V.; BALDÉ, C. P; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020 Quantities, flows, and the circular economy potential.** 2020. Disponível em: <https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf>. Acesso em: 03 de jan. 2023.

FRANCO, R. G. F.; BARROS, R. T. V. **Revisão das técnicas utilizadas na recuperação de metais em resíduos de placas de circuito impresso (RPCI).** VII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Campina Grande/PB, 2016.

GARCIA, O., BEVILAQUA, D. **Microbiologia ambiental: micro-organismos, minerais e metais**. p49-81. Embrapa, Jaguariúna, 2008.

GERBASE, A. E; OLIVEIRA, C. R.; **Reciclagem do lixo de informática: uma oportunidade para a química**. Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Química Nova, Porto Alegre – RS, 2012.

GIESE, E. C.; BLANCO, J.; LINS, F. A. F.; XAVIER, L. H. **Mineração urbana e cooperativismo: uma abordagem sobre a reciclagem de resíduos de eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2021

GREENELETRON. **O que é a mineração urbana?**. 2019. Disponível em: <<https://greeneletron.org.br/blog/o-que-e-a-mineracao-urbana/>>. Acesso em: 05 de mai. 2023.

GUPTA, M.; KURUPPATH, A.; UPADHYAYA, V.; NIGAM, S. **Metal Recovery from E-Waste by Recycling Techniques: A Review**. 8th International Conference on Smart Structures and Systems (ICSSS), 2022.

KRISHNAMOORTHY, S; GNANASEKARAN, R; DHANDAPANI, B. **Recovery of valuable metals from waste printed circuit boards using organic acids synthesised by Aspergillus niveus**. IET Nanobiotechnology, 2021.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União, 02 de ago. de 2010.

CETEM. **Resíduos de origem eletrônica**. Série tecnologia ambiental. 2010. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/313/1/sta-57.pdf>>. Acesso em: 01 de abr. 2023.

CUI, J.; ROVEN, H. J. **Electronic Waste**. In: LATCHER, T. M.; VALLERO, D. A. Waste: a handbook for management. 1º ed , Elsevier, 2011, p. 281-294.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de minérios**. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MARRA, A.; CESARO, A.; BELGIORNO, V. **The recovery of metals from WEEE: state of the art and future perspectives**. Global NEST Journal, 2018.

MATA, Rafael Vendrame da. **Estudo das técnicas de reciclagem de metais em placas de circuito impresso**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MEDEIROS, Natália Moraes. **Caracterização e separação física de placas de circuito impresso de computadores obsoletos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

MORAES, Viviane Tavares de. **Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impresso de celulares obsoletos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

OLIVEIRA-NETO, José Francisco. **Caracterização dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos Produzidos em Bairros de Classe Média-alta de Caruaru/PE.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Federal de Pernambuco, UFPE-CAA. Caruaru, 2019.

OLIVEIRA, Bruno Ferreira Brás. **Obsolescência programada e a proteção do consumidor: uma perspectiva jurídica nacional e comparada.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Direito, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2020.

OLIVEIRA, Camila Reis. **Alternativas tecnológicas para o tratamento e reciclagem do lixo de informática.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

OLIVEIRA, L. H.; SILVEIRA, M. A. **Caracterização e análise da cadeia produtiva de PCIs: uma contribuição para o aumento da competitividade da indústria nacional.** XII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais, São Paulo, Brasil, 2009.

PRIYA, A.; HAIT, S. **Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching.** Environmental Science and Pollution Research, 2017.

SILVA, Emanuel Carlos Santana da. **Placas de circuito impresso: levantamento da composição.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019.

SCHLUEP, M.; HAGELUEKEN, C.; KUEHR, R.; MAGALINI, F.; MAURER, C.; MESKERS, C.; MUELLER, E.; WANG, F. **Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies.** Recycling from E-Waste to Resources. United Nations Environment Programme and United Nations University, 2009.

SCHNEIDER, Alice Frantz. **The recycling of electronic waste: regulations and corporate strategies in Brazil and in Europe.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola Politécnica de São Paulo. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2016.

SILVA, Maria do Socorro Bezerra da. **Estudo da remoção de metais pesados de placas de circuito impresso por eletrodeposição utilizando eletrodos de cobre.** Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

SILVEIRA, André Vicente Malheiros da. **Aplicação da separação eletrostática na separação de resíduos poliméricos e baterias de íon lítio.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2016.

TOZZI, Laís Pereira. **Reciclagem de placas de circuito impresso para Obtenção de metais não ferrosos.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017.

TUNCUK, A.; STAIZI, V.; AKCIL, A.; YAZICI, E. Y.; DEVECI, H. **Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling.** Minerals Engineering, 2012.

UMICORE. **Refino de Metais Preciosos (PMR).** S.d. Disponível em: <<https://www.unicore.com.br/pt/nossos-sites/guarulhos/pmr/#:~:text=A%20cada%20ano%20a%20unidade,para%20a%20reciclagem%20destes%20materiais.>> Acesso em: 21 de abr. 2023.

UNEP. **Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles: A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel.** 2013. Disponível em: <<https://www.resourcepanel.org/reports/environmental-risks-and-challenges-anthropogenic-metals-flows-and-cycles>>. Acesso em: 16 de fev. 2023.

VEIT, Hugo Marcelo. **Emprego do processamento mecânico na reciclagem de sucata de placas de circuito impresso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.

VERMESAN, H.; TIUC, A. E.; PURCAR, M. **Advanced Recovery Techniques for Waste Materials from IT and Telecommunication Equipment Printed Circuit Boards.** Sustainability, 2019.

WIDMER, R.; OSWALD-KRAPF, H.; KHETRIWAL, D.; SCHNELLMANN, M.; BÖNI, H. **Global perspectives on e-Waste.** Environmental Impact Assessment Review, 2005.

WU, Z.; YUAN, W.; LI, J.; WANG, X.; LIU, L.; WANG, J. **A critical review on the recycling of copper and precious metals from waste printed circuit boards using hydrometallurgy.** Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017.

XAVIER, L. H.; LINS, F. **Mineração Urbana de resíduos eletroeletrônicos: uma nova fronteira a explorar no Brasil.** Brasil mineral, 2018.

YU, J.; WILLIAMS, E.; JU, M. **Review and prospects of recycling methods for waste printed circuit boards.** IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2009.

ANA PAULA DOS SANTOS SILVA

MINERAÇÃO URBANA A PARTIR DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESSO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS: um estudo de caso na cidade de Caruaru-PE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Civil do Campus Agreste da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, na modalidade de artigo científico, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia ambiental com ênfase no tratamento de Resíduos Sólidos e Líquidos

Aprovado em 12 de maio de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dra. Simone Machado Santos (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a. Dra. Elizabeth Amaral Pastich Gonçalves (Avaliadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. MSc. José Francisco De Oliveira Neto (Avaliador)
Centro Universitário Maurício de Nassau