



Felipe Seabra d'Almeida

**Avaliação tecnológica e econômica de
uma rota de processamento para
reciclagem de sucatas eletrônicas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rodrigo Fernandes Magalhães de Souza
Coorientador: Roberto Bentes de Carvalho

Rio de Janeiro
Agosto de 2021



Felipe Seabra d'Almeida

Avaliação tecnológica e econômica de uma rota de processamento para reciclagem de sucatas eletrônicas

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia Química e de Materiais do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Rodrigo Fernandes Magalhães de Souza

Orientador e Presidente
Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC Rio

Prof. Roberto Bentes de Carvalho

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC Rio

Prof. Francisco José Moura

Departamento de Engenharia Química e de Materiais – PUC Rio

Prof. Felipe Sombra dos Santos

Escola de Química - UFRJ

Rio de Janeiro, 27 de Agosto de 2021

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador

Felipe Seabra d'Almeida

Graduou-se em Engenharia Química pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, Brasil).

Ficha Catalográfica

Almeida, Felipe Seabra d'

Avaliação tecnológica e econômica de uma rota de processamento para reciclagem de sucatas eletrônicas / Felipe Seabra d'Almeida ; orientador: Rodrigo Fernandes Magalhães de Souza ; coorientador: Roberto Bentes de Carvalho. – 2021. 95 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Química e de Materiais, 2021.
Inclui bibliografia

1. Engenharia Química e de Materiais – Teses. 2. Reciclagem de lixo eletrônico. 3. Recuperação de metais preciosos. 4. Mineração urbana. 5. Econômica circular. I. Souza, Rodrigo Fernandes Magalhães de. II. Carvalho, Roberto Bentes de. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Química e de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

Agradecimentos

Dedico este projeto primeiramente a Deus. Dedico aos meus pais, José Roberto Moraes d'Almeida e Ana Lúcia Fampa Seabra d'Almeida, meus irmãos, Juliana Seabra d'Almeida e Henrique Seabra d'Almeida, minha avó, Ana Maria Fampa Seabra e a Mel e Lua.

Aos meus amigos: Allan Cytryn, Diandra Ribas, Layne Gontijo, Diogo Prado, Marcello Tostes, Maximiliano Kaiser, Brunna Accardo, Giulia Lofiego, Giulia Simão, Thalita Caldas, Flávia de Miranda e Renan Fraga.

Ao meu orientador Rodrigo F. M. Souza e, meu coorientador Roberto Bentes, por todo apoio, confiança e orientação na realização do trabalho.

Ao professor Roberto Ribeiro de Avillez, por todo apoio.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro concedido durante o curso de mestrado. ~

A CAPES e todas as instituições e órgãos governamentais ou privados que contribuem com a pesquisa e desenvolvimento científico do Brasil.

Aos amigos, professores, pesquisadores e funcionários do Departamento de Engenharia de Química e de Materiais (DEQM) da PUC-Rio, pelos ensinamentos, sugestões e conversas durante a realização deste trabalho.

Ao instituto Tecgraf e a equipe de Fabricação Digital.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

D’Almeida, Felipe Seabra; Souza, Rodrigo Fernandes Magalhães; Carvalho, Roberto Bentes. **Avaliação tecnológica e econômica de uma rota de processamento para reciclagem de sucatas eletrônicas**. Rio de Janeiro, 2021. 95p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O Brasil é o segundo maior produtor de lixo eletrônico das Américas, com uma produção que cresce a cada ano e apenas 10% dela sendo tratada de forma apropriada. Adicionalmente, o Brasil não possui tecnologia própria para tratamento de placas de circuito impresso, componente chave presente neste tipo de resíduo. Atualmente, o Brasil não possui uma planta industrial voltada para essa atividade extrativista a partir de resíduos eletrônicos, sendo a maior parte do seu tratamento realizado no exterior. A hipótese de pesquisa deste manuscrito é que as universidades e suas comunidades poderiam desenvolver fontes de matéria-prima para tais processos de extração e, portanto, merecem atenção para a criação de pontos de coleta e parcerias. Nesse contexto, é necessário entender o comportamento dessa comunidade em relação à aquisição, armazenamento e descarte de equipamentos eletrônicos, bem como informações sobre temas relacionados ao gerenciamento e reciclagem de resíduos eletrônicos. Adicionalmente, criou-se uma rota conceitual de tratamento, a partir da integração de tecnologias descritas na literatura. Após a criação do design da rota, foi realizado um balanço de massa e energia, considerando dois casos base de fonte de placas de circuito impresso como matéria prima: A) Lixo eletrônico em geral; B) utilizando somente celulares. Para ambos os casos, foi considerado o tratamento de 2 t/h. Determinou-se que o grupo estudado possui mais de 16,96 milhões de telefones celulares em hibernação, além de outros equipamentos, com valor de estoque estimado em US \$ 67,45 milhões para o grupo estudado na região metropolitana do Rio de Janeiro. Se extrapolado para todo o Brasil, pode chegar a US \$ 797,50 milhões para o grupo estudado. uma taxa interna de retorno de 141,6% e 3990,7% para o caso A e B, respectivamente e valor presente líquido de USD 44,834,616 e USD 3,215,300,083 para o caso A e B, respectivamente. Adicionalmente, foi determinado que o caso A possui uma grande sensibilidade a variação da taxa de ocupação. Neste contexto, a presente pesquisa tem o potencial de ajudar na criação da primeira planta industrial brasileira voltada para a reciclagem de placas de circuito impresso, assim como entender quais são as variáveis chaves para o processamento destes componentes. Adicionalmente, o projeto apresenta o

investimento necessário para a criação da planta, sendo uma informação crucial para potenciais investidores.

Palavras-chave:

Reciclagem de lixo eletrônico; Recuperação de metais preciosos, Mineração Urbana, Econômica Circular

Abstract

D’Almeida, Felipe Seabra; Souza, Rodrigo Fernandes Magalhães; Carvalho, Roberto Bentes. **Technological and economic assessment of a processing route for electronic waste recycling**. Rio de Janeiro, 2021. 95p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Química e de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Brazil is the second largest producer of electronic waste in the Americas, with a production that grows each year and only 10% of it is properly treated. Additionally, Brazil does not have its own technology for treating printed circuit boards, a key component present in this type of waste. Currently, Brazil does not have an industrial plant dedicated to this extractive activity from electronic waste, with most of its treatment carried out abroad. The research hypothesis of this manuscript is that universities and their communities could develop raw material sources for such extraction processes and, therefore, deserve attention for the creation of collection points and partnerships. In this context, it is necessary to understand the behavior of this community in relation to the acquisition, storage and disposal of electronic equipment, as well as information on issues related to the management and recycling of electronic waste. Additionally, a conceptual treatment route was created based on the integration of technologies described in the literature. After creating the route design, a mass and energy balance was carried out, considering two base cases of printed circuit boards as raw material: A) Electronic waste in general; B) using cell phones only. For both cases, the treatment of 2 t/h was considered. It was determined that the studied group has more than 16.96 million cell phones in hibernation, in addition to other equipment, with an estimated inventory value of US\$ 67.45 million for the studied group in the metropolitan region of Rio de Janeiro. If extrapolated to all of Brazil, it could reach US\$ 797.50 million for the studied group. an internal rate of return of 141.6% and 3990.7% for case A and B, respectively, and net present value of USD 44,834,616 and USD 3,215,300,083 for case A and B, respectively. Additionally, it was determined that case A is highly sensitive to occupancy rate variation. In this context, this research has the potential to help in the creation of the first Brazilian industrial plant dedicated to the recycling of printed circuit boards, as well as to understand the key variables for the processing of these components. Additionally, the project presents the investment necessary for the creation of the plant, being crucial information for potential investors.

Keywords:

E-waste recycling; Recovery of Precious Metals, Urban Mining, Circular Economy

Sumário

1.	Introdução	13
2.	Revisão Bibliográfica	15
2.1.	Resíduo Eletrônico	15
2.2.	Lixo Eletrônico: Políticas e Gestão	19
2.3.	União Europeia	20
2.4.	China	21
2.5.	Japão	22
2.6.	Austrália	23
2.7.	Brasil	24
2.8.	Lixo Eletrônico na Economia Circular e Mineração Urbana	27
2.9.	Processamento de PCB	30
2.10.	Materiais Orgânicos e Cerâmicos	33
2.11.	Cobre	34
2.12.	Prata	35
2.13.	Ouro	36
2.14.	Metais do Grupo da Platina	37
3.	Objetivos	38
3.1.	Objetivo principal	38
3.2.	Objetivos secundários	38
4.	Análise da Contribuição do Estudo Realizado	38
5.	Manuscrito 1	40
5.1.	Introdução	41
5.2.	Metodologia	43
5.2.1.	Design do questionário	43
5.2.2.	Amostragem e distribuição do questionário	44
5.2.3.	Resultados	45
5.2.4.	Perfil da comunidade universitária do Rio de Janeiro	45
5.2.5.	Característica dos dispositivos eletrônicos em uso	46
5.2.6.	Quantidade em hibernação	49
5.2.7.	Razões para obsolescência/troca de aparelhos	50
5.2.8.	Conhecimentos Gerais do Grupo de estudo	54

5.3.	Discussão	56
5.4.	Conclusão	58
6.	Manuscrito 2	60
6.1.	Introdução	61
6.2.	Metodologia	63
6.2.1.	Suposições do processo	63
6.2.2.	Análise econômica	64
6.3.	Resultados	65
6.3.1.	Descrição do processo	65
6.3.2.	Balanço de massa e energia	70
6.3.3.	Estimativa de custos	72
6.4.	Discussão	74
6.4.1.	Avaliação econômica	74
6.4.2.	Análise de sensibilidade	77
6.5.	Conclusão	78
7.	Considerações Finais	79
8.	Sugestões para Trabalhos Futuros	80
9.	Referências	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Resultado da pesquisa em relação ao número de aparelhos eletrônicos em uso.	47
Figura 2. Tempo de hibernação dos dispositivos no Rio de Janeiro.	50
Figura 3. Motivos para a aquisição de novos dispositivos entre os entrevistados.	50
Figura 4. Motivos para os dispositivos terem sido substituídos.	51
Figura 5. Motivos pelos quais os entrevistados mantêm os dispositivos guardados.	52
Figura 6. Opiniões dos participantes sobre como eles lidariam com as opções de descarte de dispositivos obsoletos	53
Figura 7. Resultado das perguntas de conhecimento geral.	54
Figura 8. Diagrama de blocos da primeira parte da rota proposta.	66
Figura 9. Diagrama de blocos da segunda parte da rota proposta.	68
Figura 10. DRE para o caso A.	74
Figura 11. DRE para o Caso B	75
Figura 12. Fluxo de Caixa Livre acumulado para o caso A.	76
Figura 13. Fluxo de Caixa Livre acumulado para o caso B.	76
Figura 14. Análise de sensibilidade para zerar o VPL para o caso A.	77
Figura 15. Análise de sensibilidade para zerar o VPL para o caso B.	78

Lista de Tabelas

Tabela 1. Total de lixo eletrônico descartado pelos cinco maiores países geradores por continente em 2019. Dados retirados de [4].	16
Tabela 2. Grupos de metais presentes no lixo eletrônico e seus principais elementos.	17
Tabela 3. Composição média de uma placa de circuito impresso.	30
Tabela 4 - Perfil do participante com base no gênero, nível de escolaridade, idade e número de pessoas que vivem na mesma residência.	46
Tabela 5. Uso de dispositivos entre o meio acadêmico do Rio de Janeiro e comparação com a população brasileira e estudantes chineses da província de Jiangsu.	46
Tabela 6. Unidades per capita de dispositivos em hibernação no grupo avaliado em comparação com estudantes chineses.	49
Tabela 7 - Valores médios de composição de metais nos equipamentos analisados.	56
Tabela 8 - Pesos médios considerados neste trabalho.	57
Tabela 9. Massa estimada de metais presentes em equipamentos eletrônicos em hibernação entre o grupo analisado no estado do Rio de Janeiro.	57
Tabela 10. Massa estimada de metais presentes em equipamentos eletrônicos em hibernação entre estudantes universitários e funcionários de universidades no Brasil.	58
Tabela 11. Valores de frações obtidos na literatura para tratamento das PCB.	64
Tabela 12. Vazões e composições das correntes de entrada e de saída da primeira parte do processo.	70
Tabela 13. Vazões e composições das correntes de entrada e de saída da segunda parte do processo.	70
Tabela 14. Consumo de energia para processar o PCB para o Base Case A	
Tabela 15. Consumo de energia para processar o PCB do Base Case B	
Tabela 16. Custos de equipamento de processo principal para o caso base	72
Tabela 17. Capex total para os casos A e B.	73
Tabela 18. Despesas anuais do processo para os casos A e B.	73

1.

Introdução

Em 2019, a estimativa de geração mundial de lixo eletrônico para o ano de 2021 era de 52,2 milhões de toneladas [1–3]. Porém, ao final daquele ano, esta estimativa já havia sido superada, onde foram gerados em 2019 cerca de 53,3 milhões de toneladas de sucata eletrônica [4]. Esta taxa de geração de lixo eletrônico representa de 3-5% da quantidade total de resíduos gerados no mundo [5–7] e somente 20% destes resíduos é propriamente tratada [3,8]. Neste contexto, o Brasil é o segundo maior gerador de Lixo eletrônico (*Waste Electrical and Electronic Equipment – WEEE*) das américas, com uma produção anual superior a 2 milhões de toneladas [4] e, menos de 10% de todo este resíduo é tratado de forma minimamente apropriada [9,10].

Desta forma, surge a necessidade de lidar com o lixo eletrônico gerado no Brasil, o qual possui uma grande quantidade de recursos materiais que podem ser recuperados e reutilizados. Partindo desta necessidade, surgem conceitos e ideias voltadas para a gestão e tratamento destes resíduos, onde podem ser notadamente citados a economia circular e a mineração urbana [11,12]. Dada essa elevada concentração de metais, a extração de componentes chaves presente em equipamentos sucateados requer apenas de 10% a 15% da energia utilizada na extração de metais em concentrados de minério [5,13]. Sendo assim, a reciclagem de lixo eletrônico é o ponto chave da mineração urbana, onde há um grande potencial para extração de materiais com valor econômico agregado, como metais preciosos e cobre [11,14–16].

Dentre todos os componentes presentes no lixo eletrônico, pode-se citar as placas de circuito impresso como um dos componentes mais complexos e com maior potencial de ser fonte de materiais com alto valor agregado [9,17]. Anualmente, a fabricação mundial destas placas vem apresentando um crescimento de 17-25% [18], onde em média ela representa cerca de 3 a 6% de toda massa presente no lixo eletrônico [19,20].

No Brasil, em 2018, existiam 134 centros de reciclagem de sucata e 13 centros de exportação no país, onde a maior concentração dessas empresas se dá na região sul e sudeste do país [21]. E praticamente todos os centros de reciclagem só realizam as primeiras etapas desse processo, as quais seriam a separação e desmanche dos equipamentos, não sendo realizadas as etapas posteriores de processamento e recuperação dos componentes presentes na sucata eletrônica. Sendo assim, componentes complexos com alto valor agregado, como placas de circuito impresso, são normalmente exportados para fora do Brasil, normalmente para o Canadá, Bélgica e Singapura [9,22,23].

Um motivo para os componentes complexos serem exportados é o de que o Brasil não possui tecnologia nacional para o tratamento destes componentes, necessitando assim de incentivos para a realização de estudos visando a criação de tecnologias brasileiras para o tratamento e reciclagem dos mesmos [9,23].

Nesse contexto, os objetivos do presente trabalho estão associados com estudo do comportamento de um segmento social brasileiro em termos do perfil de comportamento de consumo, descarte e hibernação relacionado a dispositivos amplamente utilizados. Adicionalmente, foi proposta uma rota conceitual brasileira para o tratamento de componentes complexos de lixo eletrônico (i.e. placas de circuito impresso), para tal finalidade foram analisados diversos trabalhos da literatura. Através de várias potenciais tecnologias revisadas na literatura, foi criada uma rota integrada para extrair materiais de alto valor agregado de placas de circuito impresso. Adicionalmente, foi criado diagramas de bloco da rota criada, foi realizado o balanço de massa e energia e balanço econômico da rota criada, para determinar a viabilidade do tratamento do lixo eletrônico no Brasil.

2.

Revisão Bibliográfica

2.1. Resíduo Eletrônico

A quantidade de lixo eletrônico gerado mundialmente cresce vertiginosamente todo ano, onde desde 2005 essa taxa de crescimento é de aproximadamente 5% ao ano [24–27]. Esse crescimento exacerbado pode ser explicado por vários fatores distintos: como a obsolescência cada vez mais rápida dos equipamentos eletrônicos, o fim da vida útil do equipamento, o consumismo desenfreado observado na sociedade atual, o crescimento populacional, etc. [5,28].

A variedade de resíduos que são classificados como lixo eletrônico é extensa, variando de eletrodomésticos a computadores e celulares, com uma composição média aproximada de 60% em peso de metais, 15% em plásticos e 12% em telas de cristais líquido ou tubos catódicos. Onde uma grande quantidade desses materiais pode ser classificada como tóxica, podendo gerar impactos ambientais decorrentes do descarte indevido desse tipo de resíduo, gerando a preocupação de definir qual a melhor forma de tratamento que deve ser dado ao lixo eletrônico. Materiais como retardantes de chama a base de bromo, cádmium, chumbo e poluentes orgânicos, são encontrados em quantidades significativas no lixo eletrônico [29]. Analisando, através de uma vertente mais focada na economia, a reciclagem do lixo eletrônico pode trazer benefícios uma vez que a concentração de metais no mesmo é imensamente superior a concentração encontrada em minérios [24,30,31].

Em 2019, a estimativa de geração mundial de lixo eletrônico para o ano de 2021 era de 52.2 milhões de toneladas [1], porém ao final daquele ano, esta estimativa já havia sido superada, onde foram gerados em 2019 cerca de 53.3 milhões de toneladas de sucata eletrônica [4]. Esta taxa de geração de lixo eletrônico representa de 3-5% da quantidade total de resíduos gerados no mundo [5,30]. E as tecnologias atuais utilizadas para reciclagem do lixo eletrônico apresentam em sua maioria uma baixa eficiência na recuperação de materiais valiosos onde há normalmente riscos ambientais associados. Sendo assim, a cada ano que se passa fica mais claro que é necessário a criação de tecnologias eficientes e políticas de reciclagem do lixo eletrônico [1,5,18,26]. Na Tabela 1 estão apresentados os principais geradores de lixo eletrônico por continente.

Tabela 1. Total de lixo eletrônico descartado pelos cinco maiores países geradores por continente em 2019. Dados retirados de [4].

País/Continente	Total de lixo eletrônico gerado (em kt) em 2019
EUA	6918
Brasil	2143
México	1220
Canadá	757
Argentina	465
Américas	13100
Nigéria	461.3
África do sul	415.4
Algeria	308.6
Marrocos	164.5
Angola	125.1
África	2900
China	10129
Índia	3230
Japão	2569
Indonésia	1618
Turquia	847
Ásia	24900
Rússia	1631
Alemanha	1607
Reino Unido	1598
França	1362
Itália	1063
Europa	12000
Austrália	554
Nova Zelândia	96
Papua Nova Guiné	9
Fiji	5
Samoa	0.6
Oceania	700
Mundo	53300

O lixo eletrônico é formado por uma grande variedade de componentes, como fios, baterias, componentes estruturais, telas de LCD, placas de circuito interno, etc. Onde a porcentagem em peso de cada componente em uma determinada sucata pode ter uma grande variação, dependendo muito da marca e no tipo de aplicação que o equipamento eletrônico sucateado exercia. Usando como exemplo os aspiradores de pó, eles

possuem uma composição em massa de 73% em componentes estruturais de movimento, 18% em bateria, 5% em placas de circuito impresso e 3% em fios [32]. Devido à grande variedade de componentes presentes no lixo eletrônico, está presente em sua composição uma grande gama de elementos. Neste contexto, pode-se dividir os elementos metálicos encontrado na sucata eletrônica em 5 grupos: O de metais preciosos, metais do grupo da platina (PGM), metais base, metais que apresentam risco ao meio ambiente e metais escassos [5]. Na Tabela 2 estão apresentados os grupos, assim como os elementos constituintes deles.

Tabela 2. Grupos de metais presentes no lixo eletrônico e seus principais elementos. Adaptado de [5,31].

Grupo	Elementos
Metais Preciosos	Au e Ag
Metais do grupo da platina	Pd, Pt, Rh, Ir e Ru
Metais Base	Cu, Al, Ni, Sn, Zn e Fe
Metais com risco ao meio ambiente	Hg, Be, In, Pd, Cd, As e Sb
Metais escassos	Te, Ga, Se, Ta e Ge

Vale ressaltar que a classificação dos metais nesses 5 grupos, não é uma regra universal e, outros autores utilizam outras formas de classificação. No entanto, as classificações acabam sempre sendo bem parecidas, onde por exemplo, os metais do grupo da platina são colocados junto com os metais preciosos [34].

Equipamentos eletrônicos típicos de virarem sucata eletrônica são: refrigeradores e ar condicionado, máquinas de lavar, televisões, computadores, celulares e impressoras. Como já mencionado, dada a grande heterogeneidade desses equipamentos, em cada um será encontrado diferentes componentes com diferentes composições de materiais, porém praticamente todos eles possuem placas de circuito impresso [17].

As placas de circuito impresso (do inglês *Printed Circuit Boards* –PCBs), podem ser consideradas como o cérebro de qualquer dispositivo eletrônico. Anualmente, sua fabricação tem um crescimento de até 25%, na qual em média representa cerca de 2 a 3% de toda massa presente no lixo eletrônico [18,35], porém para certos equipamentos, sua fração mássica pode ser muito mais elevada, onde para celulares representam cerca de 25% da massa, para computadores cerca de 20% da massa e para TVs 10% [35,36]. Basicamente todas as PCBs são constituídas de um suporte composto por epóxi e fibra de vidro com as superfícies de placas de cobre, uma camada de solda e a mais variada gama de metais presentes no circuito, podendo ser citados metais nobres como ouro (Au), platina (Pt), prata (Ag) etc. Devido a essa composição nada homogênea, há uma grande dificuldade para reciclar as PCBs [17].

Sendo assim, um dos maiores desafios da atualidade é criar processos capazes de reciclar todos os materiais presentes nessas placas. Por esse motivo cada vez mais surgem trabalhos propondo rotas que tentam atingir esse objetivo. E essas rotas, normalmente, acabam sempre recorrendo a pirometalurgia ou a hidrometaurgia, uma vez que esses tipos de rota já são amplamente utilizados na área de mineração e metalurgia para extrair metais presentes em minérios [17,18].

2.2. Lixo Eletrônico: Políticas e Gestão

Como dito anteriormente, a geração cada vez maior de lixo eletrônico no mundo cria preocupações e desafios, onde apenas cerca de 25% de toda a sucata eletrônica recebe um tratamento adequado [37]. Nesse contexto, vários países já começaram a criar políticas e gestões voltadas para tentar contornar os impactos gerados pelos resíduos provenientes dos dispositivos eletrônicos. Porém ainda há uma grande diferença entre como cada país gere o descarte e a reciclagem desse tipo de lixo, onde há notadamente uma grande discrepância entre países desenvolvidos e subdesenvolvidos.

Leis regulatórias restringindo o descarte de materiais potencialmente perigosos para o meio ambiente e para a vida em geral, criadas principalmente em países desenvolvidos gerou uma movimentação mundial de resíduos. Países subdesenvolvidos, com leis ambientais fracas ou inexistentes recebem, lixos provenientes de países desenvolvidos. Com o intuito de barrar essa movimentação de resíduos, foi convencionado na ONU que todos os países que exportam resíduos tóxicos devem antes ter a permissão dada pela nação destinatária. Porém na prática essa convenção ainda não surtiu o efeito desejado e países como a China e Índia ainda são receptores de resíduos potencialmente tóxicos [38].

Desde 2002, o comércio e movimentação de e-waste entre países se dá de acordo com a convenção de Basel, a qual restringe este tipo de movimentação, permitindo apenas que ela ocorra se a sucata for gerida de forma ambientalmente correta e, proibindo a exportação de contaminantes [24]. Porém, a maior parte do lixo eletrônico ainda acaba sendo exportado para a China ou Índia [37].

Outros projetos visando conter o deslocamento ilegal de resíduos tóxicos e melhorar a gestão de descarte e reciclagem de lixos eletrônicos foram criados. Serão então abordadas as políticas e gestões de alguns países em relação aos e-waste.

2.3. União Europeia

Em 1998, a produção de lixo eletrônico na União Europeia era estimada em 6 milhões de toneladas, com um crescimento anual de 3-5 % por ano [39,40]. E em 2014 a geração era de 11,6 milhões de toneladas, tornando a UE a segunda maior geradora deste tipo de lixo, atrás apenas da Ásia [24]. Devido a este crescimento, a Comissão Europeia criou diretivas voltadas a gestão do lixo eletrônico, e em 2003 a primeira diretiva 2002/96/EC entrou em vigor [41]. Com esta diretiva, foram determinados tópicos como a prevenção, reuso e reciclagem de lixo eletrônico, onde foram abordadas 10 categorias de resíduos eletrônicos. Com esta diretiva, cada estado membro da UE possui a liberdade de criar a logística reversa que julgue necessária para seu país, porém estabelece que os produtores de resíduos eletrônicos têm a obrigação de coletar e tratar os produtos descartados, em outras palavras, cada fabricante é responsável pelos seus produtos após serem descartados. Metas ainda foram estabelecidas para os anos seguintes a criação da diretiva, tais como os produtores tinham até 2005 para marcar todos os produtos eletrônicos que eles comercializavam e se responsabilizar pela gestão dos resíduos produzidos e até o final de 2006. Todo o lixo eletrônico deveria ser separado por categoria e cada deveriam ser coletados 4 kg de lixo por habitante por ano [42,43].

Por mais que a diretiva 2002/96/EC tenha estabelecido os pilares para a gestão do e-waste na União Europeia, as metas de coleta estabelecida por ela não se encaixam com a situação de cada estado membro da União [44]. Sendo assim, em 2008 foi proposto uma nova meta de coleta, a qual foi estabelecida na diretiva 2012/19/EU [45], onde cada país membro deve coletar até 2019 65% em massa da média de equipamentos eletrônicos postos à venda nos últimos dois anos [42,46]. E em 2011 essa porcentagem era estimada em 36% [24]. Outra mudança que a diretiva 2012/19/EU adicionou foi que, a partir 2018 as categorias de classificação do lixo eletrônico foram reduzidas de dez para seis. Desta maneira, a diretiva 2012/19/EU atualizou a diretiva de 2002, trazendo metas maiores para o tratamento de lixo eletrônico [35].

2.4. China

A geração de lixo eletrônico na China é maior que a média mundial, possuindo uma taxa de crescimento de 13 a 15% ao ano. Este crescimento exacerbado é em parte explicado pela importação de lixo de outros países [39,47]. Estimativas eram de que no início do século XXI, cerca de 70% de todo o lixo eletrônico gerado em países desenvolvidos era exportado para a China [37,43,48]. Dado este fato, as primeiras leis criadas para a gestão do lixo eletrônico não focavam na geração interna de lixo, e sim na sua importação, banindo certos tipos de sucata as quais possuíam substâncias altamente nocivas [43]. Neste contexto, é esperado que por volta do ano de 2023, a China pare de importar lixo eletrônico [37,49].

As principais leis Chinesas para gestão do lixo eletrônico são hoje baseadas nas diretivas europeias [43], onde elas tentam contornar a poluição gerada pelo descarte de equipamentos eletrônicos e focam em reaproveitar os materiais presentes na sucata [44]. Devido a essas leis, subsídios estatais foram gerados para a criação de plantas de reciclagem, onde em 2015 a China contava com 106 centros voltados para algum tipo de tratamento de lixo eletrônico, podendo ser desde processos simples como desmontar os equipamentos até processos industriais voltados para a recuperação de metais em PCBs [43].

Entretanto, mesmo com leis voltadas para a reciclagem da sucata eletrônica, a China ainda conta com um sistema de coleta e reciclagem precário, baseado em estruturas informais. Possuindo poucos casos onde o sistema de coleta é formal e possui uma logística adequada, fazendo com que seja necessário a implementação de novas leis e subsídios voltados para a coleta [37,43,47].

2.5. Japão

Devido à grande densidade demográfica e a grande industrialização, em 2019, o Japão gerou quase 2,6 milhões de toneladas de lixo eletrônico, o terceiro maior gerador deste tipo de lixo na Ásia [4]. Neste contexto, desde a década de 90, leis relacionadas a gestão do lixo eletrônico foram implementadas neste país. Um bom exemplo é a Lei de reciclagem de eletrodomésticos, a qual estabeleceu que os fabricantes de ar condicionado, televisores, máquinas de lavar e refrigeradores, são responsáveis em reciclar seus equipamentos após descartados [27,50]. Devido a esta Lei, a taxa de reciclagem destes eletrodomésticos é superior maior que 85%, provando sua eficiência na mitigação de impactos ambientais que poderiam ser gerados pelo descarte indevido destes equipamentos [50].

Mais de 65% de todo o lixo eletrônico coletado no Japão segue os moldes da Lei de reciclagem de eletrodomésticos [27]. O Japão se torna assim um dos países mais avançados em termos de gestão do lixo eletrônico [51], com um sistema de reciclagem que pode economizar até 80% da energia que seria necessária para produzir os mesmos materiais de fontes virgens. O sistema de reciclagem do Japão ainda pode reduzir em 50% as emissões de gases do efeito estufa, devido a reutilização de materiais [27].

2.6. Austrália

Para o caso da Austrália, existem na legislação quatro políticas e regulamentos voltados para o descarte e processamento de lixo eletrônico. Sendo estabelecidos quatro principais agentes responsáveis pela gestão dos resíduos eletrônicos, divididos em: grandes empresas (tais como fabricantes de eletrônicos e distribuidoras), as agências reguladoras, os centros de reciclagem e o governo australiano. Em 2017, a meta de reciclagem de lixo eletrônico era de 50%, porém na prática essas políticas australianas possuem problemas como a falta de incentivo que é dada pelo governo e a falta de transparência, o que faz com que aproximadamente metade do lixo eletrônico australiano seja exportado sem nenhum tratamento prévio [52].

O estudo de Dias et al, 2019 teve como objetivo analisar a logística por trás da reciclagem de sucata eletrônica, tomando a Austrália como base. Neste estudo, foi analisada a viabilidade econômica do processamento do lixo eletrônico. Para isso, foram criadas três possibilidades para o descarte e tratamento deste tipo de sucata: 1) a reciclagem completa do lixo eletrônico, a qual inclui desde o processo de desmontar o equipamento eletrônico sucateado até processar seus componentes e utilizar processos de refino de modo a recuperar-se os materiais presentes nos mesmos, 2) parte da reciclagem ser feita dentro do país e o resto do processo ser feito no exterior e 3) o lixo eletrônico ser totalmente processado fora da Austrália.

O resultado do estudo mostrou que a reciclagem dentro do país não é vantajosa em parte pelo preço da mão de obra e pelo fato de que existem países que conseguem processar esse tipo de sucata por um preço menor que na Austrália. Sendo assim, o estudo concluiu que para o caso desse país, existem duas possíveis soluções. A primeira é o de monitorar todo o processo de reciclagem da sucata com o intuito de garantir que o mesmo não impacta o meio ambiente, para tal é necessário o monitoramento das empresas estrangeiras com a finalidade de garantir que as mesmas seguem as leis e normas australianas. A segunda solução possível é investir na indústria nacional, criando-se leis que proíbam a exportação de lixo eletrônico e subsídios que tornem economicamente viável a reciclagem [53].

2.7. Brasil

O Brasil é o segundo maior gerador de lixo eletrônico nas américas, tendo aumentado em mais de 100% sua geração de 2016, a qual era entorno de 900 mil toneladas [9,23] para mais de 2 milhões de toneladas em 2019 [4]. Porém, mais de 90% de todo esse lixo ainda não é tratado adequadamente, principalmente pela falta de investimentos financeiros voltados para o tratamento e reciclagem de sucata eletrônica e, pela falta de educação ambiental da população [9].

A primeira grande lei regulatória para este tema foi criada em 2010: a Lei 12305/2010 que cria a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)[54], a qual tem o intuito de reduzir a geração de resíduos e aumentar o reuso e reutilização de produtos, inclusive de resíduos eletrônicos. Essa nova política tem como objetivos proibir a importação de resíduos que possam ser danosos para o meio ambiente e vida, incentivar financeiramente centros de reciclagem e implementar a logística reversa no país [9,23]. Essa lei cria uma responsabilidade compartilhada entre todos os responsáveis pela geração de resíduos sólidos, incluindo sucata eletrônica [55]. Sendo assim, com essa política, os fabricantes ficam obrigados a dar um fim a seus produtos quando descartados, o governo brasileiro fica com a obrigação de regulamentar o processo de descarte e recolher a sucata e os consumidores de descartar adequadamente o seu lixo [22].

Segundo a PNRS, cada estado da federação é encarregado de criar suas próprias leis visando o descarte e processamento de lixo eletrônico e os municípios ficam encarregados de coletar esses resíduos [22]. Porém, apesar dessa política nacional ser de 2010, ela ainda não está totalmente implementada, o sistema de coleta de lixo eletrônico dos municípios é nulo ou ineficiente e há uma falta de incentivo para o desenvolvimento e implementação de tecnologias nacionais para o processamento adequado de resíduos mais complexos, tais como as placas de circuito impresso [56]. A PNRS ainda reconhece o trabalho informal de catadores de lixo, se baseando nesses trabalhadores como base do sistema de coleta [47].

No Brasil são gerados aproximadamente 2 milhões de toneladas de lixo eletrônico por ano, o que representa entre 2 a 4% de todos os resíduos produzidos no país e apenas 1% dessa sucata eletrônica é devidamente tratada. Com a PNRS, o governo tem a meta de elevar esse valor para 17%, porém para essa meta ser alcançada, é necessária a criação de uma logística a fim de tornar economicamente viável a coleta [55].

Segundo Dias, et al, 2018 [52] é necessário que incentivos sejam criados com a finalidade de realizar estudos na área de processamento de sucata eletrônica no Brasil,

uma vez que a falta de estudos relacionados a essa área dificulta a gestão desses resíduos no país. Um estudo realizado pelo autor mostrou que o governo brasileiro não tem controle sobre o número de companhias voltadas para reciclagem de lixo eletrônico no país e o governo também não tem controle sobre o tipo real de atividade que as companhias realizam, onde nos registros do governo não há distinção entre centros de tratamento de sucata eletrônica, centro de reciclagem de polímeros, ferro-velho etc.

Em 2018, existiam 134 centros de reciclagem de sucata e 13 centros de exportação no país, a maior concentração dessas empresas se dá na região sul e sudeste do país. E praticamente todos os centros de reciclagem só realizam as primeiras etapas desse processo, as quais seriam a separação e desmanche dos equipamentos, não sendo realizadas as etapas posteriores de processamento dos componentes presentes na sucata eletrônica. Sendo assim, componentes complexos com alto valor agregado, como placas de circuito impresso, são normalmente exportados para fora do Brasil, normalmente para o Canadá, Bélgica e Singapura [9,22,23].

Um motivo para os componentes complexos serem exportados é o de que o Brasil não possui tecnologia nacional para o tratamento destes componentes, necessitando assim de incentivos para a realização de estudos visando a criação de tecnologias brasileiras para o tratamento e reciclagem dos mesmos [9,23].

O maior desafio encontrado no Brasil para a reciclagem de lixo eletrônico, deve-se a logística de coleta, uma vez que toda a coleta necessita tanto de fatores como conscientização do usuário final em descartar os produtos eletrônicos em lugares apropriados, quanto a cooperação dos fabricantes, distribuidores e do governo [23,57].

O trabalho de Azevedo, et al., 2017 [23], investigou o modelo de logística proposto pelo ministério do meio ambiente em 2013. Onde, municípios com menos de 25000 habitantes devem possuir um centro de coleta de lixo eletrônico, os quais irão transferir essa sucata para a capital, sem nenhum pré-tratamento. Municípios com mais de 25000 habitantes, devem ter centros de separação, onde os componentes dos equipamentos eletrônicos devem ser separados. Componentes mais complexos, como as PCB devem ser enviados para grandes centros urbanos, onde serão processados. Os materiais recuperados serão então utilizados na indústria para a produção de novos produtos.

Para analisar o modelo proposto, foi utilizado o estado de Minas Gerais como exemplo. Os resultados encontrados sugeriram que este modelo seria economicamente viável para o estado e a instalação de indústrias de processamento de lixo eletrônico, principalmente de PCB trariam benefícios econômicos, podendo ainda gerar diretamente cerca de 15000 empregos [23].

Para a região metropolitana do Rio de Janeiro, outro trabalho analisou a quantidade de sucata eletrônica gerada, a localização das companhias de reciclagem e a gestão de

coleta deste tipo de lixo. Foi identificado que a cidade do Rio de Janeiro gera cerca de 127,4 toneladas de lixo eletrônico por dia e a região metropolitana mais de 200 toneladas. A pesquisa identificou 24 indústrias voltadas para algum tipo de reciclagem de sucata eletrônica e foram sugeridas 5 regiões onde poderia ser estabelecido uma política de logística reversa, levando-se em conta a distância entre pontos de coleta e as indústrias [12].

2.8. Lixo Eletrônico na Economia Circular e Mineração Urbana

Está cada vez mais claro que é necessário lidar com os resíduos gerados pela sociedade, os quais possuem uma grande quantidade de recursos materiais que podem ser explorados. Partindo desta necessidade, surgem conceitos e ideias voltadas para a gestão e tratamento destes resíduos, onde podem ser notadamente citados a economia circular e a mineração urbana. Juntos, estes dois conceitos podem ser aplicados no tratamento do lixo eletrônico, onde a economia circular ganha visibilidade, incentivando a utilização de fontes secundárias de matéria prima para a produção de bens de consumo e a mineração urbana visa a extração de materiais e componentes de resíduos urbanos [11].

Diferente do conceito de economia linear, o qual foi adotado por várias décadas como o melhor modelo de produção, onde a indústria utilizava somente matéria prima proveniente de fontes naturais e ao final da vida útil do bem produzido, o mesmo era descartado, sem pretensões de ser reciclado [12,58]. O modelo de economia circular é baseado no conceito dos 3 “Rs”: redução, reuso e reciclagem [34]. Através deste modelo, procura-se reduzir a utilização de recursos naturais, mitigando tanto os impactos gerados pela exploração destes recursos, quanto os impactos gerados por décadas de descarte de sucata devido a filosofia da economia linear. Sendo assim, a economia circular tenta “fechar o ciclo”, onde os materiais utilizados para a produção de um bem serão reutilizados no final [12,59].

No contexto da economia circular, [57][60], definiu 10 opções possíveis, que bens de consumo podem ser submetidos de modo a reterem seu valor. O autor ainda explica que o valor o qual ele se refere é um valor intrínseco ao da sustentabilidade e não econômico. Essas opções de manter o valor foram nomeadas de “RO”, sigla em inglês para “*retention options*” e numeradas com o grau de processamento necessário.

As primeiras 4 opções são de um ciclo pequeno (*short loop*) da economia circular, onde a primeira, a R0 é o de rejeitar, onde prega-se o fim do consumo de produtos supérfluos. A segunda, a R1 é o de redução do consumo, a terceira, a R2 seria de reutilizar produtos por fim, a R3 seria de reparar produtos ao invés de descartá-los [60].

Do R4 ao R6, as opções são para ciclos médios, onde a R4 é o conceito de remodelar o equipamento, trocando componentes desatualizados. A R5 é a remanufatura do bem de consumo, onde o mesmo seria desmontado, limpo e reparado em processos industriais. A R6 é a de reaproveitar peças funcionais em outros equipamentos [60].

Por fim, as últimas RO são de ciclos longos, onde a R7 é a de reciclar os materiais dos bens de consumo, utilizando-os novamente para a produção de novos produtos. A R8

é a de recuperar a energia presente na sucata, utilizando processos como incineração. A última opção, a R9 é a de minerar a sucata de modo a extrair materiais raros e de alto valor agregado através de processos físico-químicos [60].

Dado esse contexto, o lixo eletrônico, por possuir uma variada composição, é uma potencial fonte de extração de materiais. Quando analisada a composição de metais presentes nesse tipo de sucata, ela possui 40 a 50 vezes maior concentração que quando comparado com depósitos naturais [14]. Dada essa elevada concentração de metais, a extração de componentes chave presente na sucata eletrônica requer apenas de 10% a 15% da energia utilizada na extração de metais em minério concentrado [5,34]. Sendo assim, o lixo eletrônico é o ponto chave na mineração urbana, onde há um grande potencial para extração de materiais com valor econômico agregado, como metais preciosos e cobre [11,14].

Com a utilização da mineração urbana, pode-se reduzir a demanda por fontes primárias de metais, reduzindo assim impactos ambientais pela mineração extrativa. Esta redução traria impactos positivos ao meio ambiente, uma vez que a mineração é comumente conhecida como uma atividade não sustentável, a qual traz riscos ambientais, tais como contaminação do meio por agentes químicos, desmoronamento de barragens etc. [34,35,61]. A mineração urbana ainda permite a redução de energia necessária para processar metais e a redução da emissão de gases do efeito estufa [34], onde para o alumínio e o cobre, podem ser respectivamente economizadas até 95% e 85% da energia [35,62].

Segundo [13] [13], a mineração urbana aplicada de forma certa pode gerar empregos, mitigar os impactos da geração de lixo eletrônico e da mineração tradicional e ainda pode promover benefícios econômicos gerados através da inovação de processos e da recuperação de materiais cruciais para indústria.

A primeira fase na reciclagem do lixo eletrônico, e talvez a mais importante para o funcionamento de toda a economia circular, é a fase de logística para a coleta de forma apropriada do WEEE. Esta fase, depende de variáveis como: a presença de pontos de coleta, a conscientização dos usuários de equipamentos eletrônicos de que o descarte em lugares apropriados é necessário e a presença de organizações ou companhias voltadas para a coleta. Após a coleta e separação dos componentes da sucata eletrônica, os mesmos devem ser destinados aos processos específicos para a recuperação dos materiais presentes neles [5,63].

Como apresentado anteriormente, para a coleta da sucata eletrônica ser efetiva, é necessário a conscientização dos usuários de forma a descartarem os equipamentos eletrônicos em lugares apropriados. Sendo assim, para a obtenção de boas taxas de

coleta, é necessária a participação dos consumidores, através de políticas de conscientização [5].

Após a etapa de coleta, o lixo eletrônico deve ser processado e existem várias rotas possíveis para atingir este objetivo. Para o caso das PCB, as quais podem possuir cerca de 80% da massa de metais com alto valor agregado no lixo eletrônico, as rotas empregadas normalmente são hidrometalúrgicas, pirometlúrgica e as quais possuem uma grande eficiência, porém são uma grande fonte de poluição e normalmente não são economicamente viáveis [5,31,34]. Esta etapa será melhor explorada na seção

Processamento de PCB.

2.9. Processamento de PCB

Devido a heterogeneidade das PCB, não existe uma rota única para o processamento das mesmas, assim sendo, várias operações são aplicadas para a extração dos materiais presentes. Para a recuperação de metais, normalmente utilizam-se processos parecidos com os aplicados em minérios do mesmo metal. Sendo assim, rotas pirometalúrgicas, hidrometalúrgicas ou eletrometalúrgicas devem ser aplicadas para o processamento das placas. Na prática ocorrem processos mistos aplicando-se mais de uma rota metalúrgica [14,17]. Na Tabela 3, estão apresentadas a composição média presente em uma placa de circuito impresso, onde aproximadamente 40% da massa é composta de metais, 30% de cerâmicos e 30% de plásticos [5,64]. Vale ressaltar que as composições apresentadas podem variar drasticamente dependendo do tipo de equipamento, onde por exemplo, placas de aparelhos celulares tendem a possuir uma fração mássica de metal a cima de 60%, possuindo ainda maiores concentrações de ouro e prata quando comparada com outros equipamentos [65,66].

Tabela 3. Composição média de uma placa de circuito impresso. Adaptado de Kaya, 2016 [64].

Metais (aproximadamente 40% da massa)		Cerâmicos (aproximadamente 30% da massa)		Plásticos (aproximadamente 30% da massa)	
Cu	6-27%	SiO ₂	15-30%	PE	10-16%
Fe	1,2-8,0%	Al ₂ O ₃	6,0-9,4%	PP	4,8%
		Cerâmicos de			
Al	2,0-7,2%	alcalinos	6,0%	PS	4,8%
		terrosos			
Sn	1,0-5,6%	Titanatos	3,0%	Epóxi	4,8%
Pb	1,0-4,2%			PVC	2,4%
Ni	0,3-5,4%			PTPE	2,4%
Zn	0,2-2,2%			Nylon	0,9%
Sb	0,1-0,4%				
Au	250-2050 ppm				
Ag	110-4500 ppm				
Pd	50-4000 ppm				
Pt	5-30 ppm				
Co	1-4000 ppm				

De um modo geral todas as rotas para processamento de PCBs tem uma primeira etapa de redução de tamanho das placas, que pode ser realizada utilizando-se trituradores, moinhos de faca e moedores. O objetivo dessa etapa é ao reduzir o tamanho das placas, liberar os componentes presentes na mesma e aumentar a área superficial dos componentes, preparando-os para as etapas subsequentes [17,65].

A segunda etapa usual na reciclagem de PCBs é a separação utilizando-se vários princípios diferentes, tais como princípios físicos, tais como princípios eletrostáticos e magnéticos. Normalmente os três princípios de separação são utilizados em conjunto, onde primeiro o magnético é utilizado, fazendo-se assim a separação de materiais magnéticos dos componentes não magnéticos. Após são aplicados métodos de separação eletrostática na parte não magnética para assim separar metais (principalmente a grande quantidade de cobre presente nas placas) de não metais. Por último são aplicados os métodos de separação física a fim de separar e classificar os materiais, normalmente esses métodos se baseiam em densidade: a utilização de ciclones ou similares, ou se baseiam no tamanho das partículas: como a operação de peneiramento [17,65].

A terceira etapa é a de extração dos metais presentes nas placas, onde como já foi dito, são utilizadas técnicas metalúrgicas comumente utilizadas para a extração de metais de minérios, sendo normalmente utilizadas técnicas piro e hidro metalúrgicas [17,29,65].

As principais técnicas pirometalúrgicas empregadas na recuperação das PCB são: incineração, pirólise e decomposição por plasma. Cada tipo de técnica possui suas peculiaridades e suas principais aplicações [67].

Na incineração, as PCB são decompostas e suas frações orgânicas entram em combustão a altas temperaturas, em uma atmosfera contendo oxigênio, formando CO₂ H₂O. Após o término dessa operação, o produto restante consiste de uma fração metálica e uma não metálica inorgânica, as quais serão separadas na etapa seguinte [67].

A incineração é a técnica mais tradicional de tratamento de PCB, uma vez que é um método simples e com baixo custo operacional. Essa técnica ainda possui a vantagem de gerar energia térmica devida à combustão das frações orgânica, podendo ser utilizada para produção de energia elétrica [67].

A maior diferença entre a incineração e a pirólise se deve as condições da atmosfera presente durante o processo, onde para o caso da pirólise o meio deve ser inerte. Devido a composição da atmosfera, os materiais orgânicos presentes nas PCB são decompostos em produtos líquidos e gasosos. Igual a incineração, na pirólise concentra-se a fração metálica, e a não metálica inorgânica, uma vez que a fração orgânica, composta por polímeros, é transformada em líquido ou em gases, os quais tem potencial de serem utilizados como combustível ou reagentes químicos. Devido ao meio reacional da pirólise, normalmente o custo operacional da mesma é demasiadamente maior que o da incineração. [67,68].

Em ambas as técnicas citadas, existe a potencial formação de compostos tóxicos, com efeitos carcinogênicos, tais como Dibenzodioxinas policloradas (PCDD),

Dibenzodioxinas polibromadas (PBDD) e furanos. Dado esse fato, a aplicação dessas técnicas pode oferecer riscos ambientais, e a sua utilização deve ser com cautela [29,68,69].

Já as técnicas hidrometalúrgicas utilizadas tem o objetivo de lixiviar os metais, ou seja, transformá-los em produtos solúveis no meio aquoso para assim poderem ser recuperados. Para a etapa de lixiviação existe uma possibilidade enorme de soluções químicas que podem ser utilizadas, onde muitas vezes a escolha da mesma depende do metal que se pretende lixiviar. Na maioria das vezes, ao se empregar uma técnica hidrometalúrgica, é necessário realizar uma técnica eletrometalúrgica para se depositar o elemento em sua forma metálica [17].

As técnicas hidrometalúrgicas podem oferecer vantagens quando comparadas com as pirometalúrgicas, como por exemplo: a ausência da formação de gases tóxicos, o baixo consumo energético, a alta taxa de recuperação e o baixo custo operacional [70].

Usualmente, existem três tipos diferentes de lixiviação que são empregados no processamento de PCBs: a lixiviação química, a biolixiviação e a lixiviação utilizando-se fluidos supercríticos, onde neste último tipo, seu uso encontra-se muitas vezes restrito a pesquisas em escala laboratorial. Para a lixiviação química, existem alguns tipos de reagentes que são normalmente empregados, podendo ser citados: o cianeto, haletos, a tiuréia, o tiosulfato, a água régia e soluções iônicas como principais reagentes [70].

Um modo de evitar a utilização de reagentes que normalmente são tóxicos e corrosivos, é através de técnicas de biometalúrgia, onde são empregados microrganismos para realizarem a lixiviação dos metais. Taxas elevadas de lixiviação podem ser obtidas através do emprego destas técnicas em condições ideais, podendo ser obtidas taxas superiores a 95% para a extração de cobre [71]. As principais vantagens da biolixiviação em comparação a técnicas clássicas de lixiviação são: baixo custo de operação, baixo consumo de energia e pequena geração de subprodutos. Porém, usualmente o tempo necessário para a biolixiviação é superior ao de técnicas clássicas [31,72].

A utilização de membranas é uma possível técnica que pode ser empregada para separar os mais variados metais lixiviados, onde estas possuem boa seletividade e eficiência no transporte de íons metálicos. Combinadas com a utilização de um agente extrator, o qual age como um trocador de íons ou agente complexante com os metais dissolvidos, é possível obter-se alta seletividade para um tipo específico de íons metálico e assim, obter-se soluções com alto grau de pureza [73,74].

A seleção do agente extrator dependerá do tipo de íon metálico que se pretende obter, onde existe comercialmente uma elevada quantidade de possíveis extratantes que tem potencial de serem utilizados no processo de recuperação de metais preciosos de PCBs [74].

A quarta etapa é a de purificação dos metais extraídos na etapa anterior. Essa purificação pode se dar por processos físico-químicos e/ou por processos eletrometalúrgicos. Para os processos físico-químicos de purificação existe uma grande variedade de métodos possíveis de serem aplicados, tais como a precipitação fracionada, complexação, floculação, secagem etc. Os processos eletrometalúrgicos, normalmente são utilizados para refinar os metais após a etapa de lixiviação, podendo ser aplicados para a obtenção de cobre, prata, ouro e uma outra grande variedade de metais [17,70].

2.10. Materiais Orgânicos e Cerâmicos

Os materiais não metálicos presentes nas placas de circuito impresso representam aproximadamente três quartos da fração mássica das mesmas. Neste grupo de materiais estão presentes a fibra de vidro, retardantes de fogo a base de bromo, resinas epóxi e outros tipos de polímeros orgânicos, onde os últimos representam cerca de 32% da massa total das PCBs [75–77].

Uma possível rota tecnológica que pode ser aplicada no processamento das placas de circuito impresso é a pirólise, onde após as mesmas terem sido trituradas, elas passam por essa etapa, com o intuito de decompor toda a matéria orgânica em gases e líquidos. A composição dos gases formados nessa etapa é principalmente composta por CO, CO₂, H₂, e alcanos e alcenos de até quatro carbonos. Sendo assim, esses gases tem o potencial de serem utilizados tanto como combustível ou como precursores de sínteses na indústria química. O óleo formado também possui o potencial de ser utilizado como fonte de combustível, ou como fonte de fenóis e derivados [76,77].

Após a pirólise e outras etapas de liberação (como moagem) e classificação (como peneiramento), são obtidas fitas de fibra de vidro, as quais possuem uma função estrutural nas PCBs, dando resistência mecânica [77]. Após a recuperação da fibra de vidro, a mesma tem o potencial de ser reutilizada em outras aplicações, como a incorporação em materiais compósitos. Além das fibras de vidro, são obtidos outros compostos não metálicos provenientes dos cerâmicos presentes nas placas, estes compostos tem o potencial de serem incorporados a plásticos, serem utilizados na produção de asfalto e em alguns casos, podem ser utilizados como material absorvente no tratamento de águas [64].

Outro resíduo orgânico presente no processamento das PCBs é a escória carbônica (*carbonaceous slag*), proveniente de plásticos termofixos presentes nas placas. Essa escória pode ser utilizada como reforço estrutural em membranas de nanofibra utilizadas

em tratamento de água. Um método para a produção deste tipo de membrana, utilizando escória carbônica de PCBs, foi proposto por Senophiyah et. Al. 2020 [78].

2.11. Cobre

O cobre é o principal metal constituinte das placas de circuito impresso [35], onde segundo Kaya 2020 [61], sua fração mássica em PCB pode variar de 6 a 27%, com outras fontes citando frações médias de 20% [18], podendo atingir frações de até 35% [35]. Para o caso de aparelhos celulares, em média, a cada tonelada de aparelhos há 128 kg de cobre [65]. Dada essa alta fração de cobre, as PCB possuem de 30 a 40 vezes maior concentração que os minérios deste metal [14,72].

Um dos métodos mais comuns para extração de cobre é através da lixiviação utilizando ácido [65], podem ser empregadas soluções de HCl, as quais podem atingir rendimento de 97% a uma concentração de 2 M [79], ou soluções de H₂SO₄, com rendimento de 19% [80], ou misturas de H₂O₂ com H₂SO₄ com taxas entorno de 90% com concentrações de 2,5 M [81]. Outros tipos de soluções ácidas podem ser empregues no processo, existindo uma grande variedade de possibilidades [65].

Assim como para outros metais, a extração de cobre por lixiviação utilizando soluções iônicas é uma opção, o estudo de [18] utilizou uma solução iônica de 1-carboxmetil-3-metilimidazolium bisulfato e, com uma concentração de 90% de solução, a uma temperatura de 80 °C, foi obtido um rendimento de cobre de 98,3%.

Uma rota promissora para recuperação de cobre é a biometalúrgica, onde o estudo de Sodha et. al. 2020 [72], obteve uma extração de 99% de cobre em 48h de biolixiviação utilizando a bactéria *Leptospirillum ferriphilum*. Após o processo, o cobre foi processado utilizando o método de cementação, obtendo-se uma pureza de 93% e após um processo de refinamento, foi obtido cobre com 99% de pureza.

Sinha et al. 2018 e Kim et al. 2011 [79] [82], investigaram uma rota híbrida de processamento de PCB para obtenção de cobre, onde as placas foram submetidas a um processo de biolixiviação, após a solução contendo cobre foi purificada utilizando biomassa e por fim cobre foi obtido por eletrodeposição. Para esta rota, foi obtida uma recuperação de 92,7% de cobre com uma pureza de 95,2%.

Outro método de obtenção de cobre é pela utilização de processos eletroquímicos, onde o cobre é dissolvido mediante a aplicação de uma corrente e depois é depositado em um eletrodo. Por este método é possível obter-se cobre com 99,56% de pureza com uma eficiência de 90% [83].

Barnwal & Dhawan 2020 e Buttel et al. 2003 [28] [84], conduziram um estudo em PCBs de celulares, onde após etapas de processamento físico, tais como redução de tamanho e classificação, o cobre foi lixiviado com uma solução de HCl e H₂O₂ com uma eficiência de extração de 75%. Após, cobre metálico foi obtido por eletrodeposição, com uma pureza de 97%.

2.12. Prata

Anualmente, mais de 6800 toneladas de prata são utilizadas na produção de equipamentos eletrônicos [5]. Neste contexto, as placas de circuito impresso são uma potencial fonte secundária deste elemento, uma vez que elas possuem uma concentração que varia de 50 ppm até 3300 ppm, onde o tipo de uso e o ano de produção são determinantes na concentração de prata encontrada. Usualmente, para cada tonelada de celular há cerca de 3,63 kg de prata [65], e para cada unidade de notebook e TV há aproximadamente uma massa de prata respectivamente de 0.2g e 0.45g. Esse fato consegue demonstrar como a finalidade para a qual a placa de circuito impresso foi concebida influencia na composição da mesma [36].

Normalmente, a prata é recuperada de PCBs por rotas hidrometalúrgicas, onde frequentemente são empregados como agentes lixiviadores o H₂SO₄, HCl, HNO₃, cianeto, tiuréia, etc. [69]. Estudos, utilizando novas tecnologias, buscam determinar outros tipos de agentes lixiviadores e rotas, que tenham uma alta recuperação de prata. Um processo que pode ser promissor, é a extração utilizando dióxido de carbono no estado supercrítico após um tratamento com água também em estado supercrítico. Por esse método foi recuperado 96% da prata presente em PCBs [36,85]. A utilização de ácido nítrico como agente lixiviador também é uma opção, com estudos obtendo uma recuperação de até 94% de prata [36,86].

Outro método que possui alta recuperação de prata é a lixiviação utilizando solução de iodo-iodeto após tratamento com água supercrítica (à 420 °C por 60 minutos) em PCBs moídos, com esse método foi obtida uma recuperação de 99% de prata em 90 minutos de lixiviação [36,65,87].

O uso de tiocianato como agente lixiviador após tratamento das PCBs com ácido sulfúrico e peróxido de hidrogênio obteve também uma recuperação de 99% de prata depois de uma duração de 8 horas de lixiviação [36].

Adicionalmente, a utilização de técnicas de fundição pode ser empregada para a extração de prata de PCBs, onde pode ser extraído até 95% de toda prata pode ser reduzida no processo de fundição a temperaturas superiores a 1400 °C [65,88].

2.13. Ouro

Por ser um excelente condutor de eletricidade e possuir alta resistência a corrosão, o ouro é amplamente utilizado na manufatura de placas de circuito impresso presentes em equipamentos sofisticados. Devido a este fato, estima-se que 16% de toda a reserva mundial de ouro, pode ser encontrada na mineração urbana de lixo eletrônico [89], e estima-se que mais de 290 toneladas de ouro são utilizadas por ano na manufatura de equipamentos [5].

Neste contexto, a composição média de uma placa de circuito impresso de computadores apresenta 250 gramas de ouro por tonelada de PCB e as de celulares cerca de 350 gramas, as quais são concentrações muito superiores às encontradas em minérios, os quais apresentam concentrações de 1-5 g de ouro por tonelada[34]. Sendo assim, as PCBs tornam-se uma potencial fonte secundária de ouro [29,34,65,90,91].

Usualmente, as principais técnicas utilizadas para a recuperação do ouro presente em placas de circuito impresso são baseadas em processos hidrometalúrgicos, principalmente a lixiviação utilizando cianeto. Este tipo de lixiviação é tradicionalmente utilizada na extração de ouro e prata de minérios destes metais. Por esse motivo, este reagente é um dos mais utilizados no tratamento de PCBs com o intuito de lixiviar ouro e prata. Porém, cianeto é altamente tóxico, levando a necessidade buscar-se alternativas para seu uso [70,91].

Nesse contexto, existem trabalhos na literatura que utilizam outros tipos agentes lixiviadores, como é o exemplo da utilização de persulfato de amônia, que obteve 99.43% de recuperação de ouro [92]. A utilização de haletos para a lixiviação de ouro e outros metais preciosos é uma possibilidade, porém atualmente a maioria das técnicas utilizando estes reagentes possui um rendimento menor que 60% [70]. A utilização de tiosulfato também pode ser uma alternativa, com estudos obtendo 98% de recuperação de ouro para uma lixiviação de 48h [91].

O uso de tiuréia em meio alcalino como agente lixiviante também é uma alternativa ao cianeto, uma vez que a tiuréia não é tóxica e tem um grande potencial de lixiviar ouro e prata. Porém, a taxa de lixiviação da tiuréia é inferior à do cianeto, o que limita sua aplicação industrialmente na reciclagem de PCBs. Outras alternativas são a utilização de soluções iônicas, as quais possuem alta seletividade com baixa geração de poluentes, porém possuem alto custo de aplicação [70].

Adicionalmente, existem várias outras opções de agentes lixiviadores que podem ser empregados no processo de extração do ouro de PCBs, podendo ser citadas soluções ácidas de H_2SO_4 e HNO_3 [93], ou de HCl [79], além de várias outras possibilidades [65]. A utilização de água régia também é uma opção para a extração do ouro, porém apesar deste solvente possuir uma alta taxa de dissolução do ouro, ele é altamente corrosivo, limitando sua aplicação industrial [29,94,95].

Técnicas pirometalúrgicas também são empregadas para extração de ouro em PCBs, técnicas como fundição, são comercialmente empregadas [17], podendo atingir taxas de extração de 95% de ouro. Porém a utilização destas técnicas pode apresentar desvantagens, como a necessidade de processos de tratamento para retirar impurezas [65,88].

2.14.

Metais do Grupo da Platina

Além dos metais já apresentados, as PCB usualmente ainda podem possuir quantidades apreciáveis de Pd, uma vez que entre 8 a 9% da demanda mundial deste elemento é dada para a produção de componentes eletrônicos [96]. Dependendo do tipo de PCB, a concentração de Pd nela pode ser de até 100 mg/kg, tornando-as assim uma possível fonte secundária destes elementos [96,97].

Um método possível para recuperação de Pd em PCBs consiste em lixiviar as placas com HNO_3 a 3M, e após realizar uma extração líquido-líquido utilizando uma solução de tolueno com o composto químico BDMA como agente extratante, uma vez que o mesmo possui afinidade pelo Pd. Após a extração, o Pd pode ser precipitado utilizando-se uma solução contendo 28% de amônia, obtendo-se um sal de paládio. Com este método, foi possível obter uma solução aquosa de paládio com 99,4% de pureza, que após precipitado, o sal apresentou alto grau de pureza, não sendo detectadas impurezas pelos métodos EDS e XRD [96].

Neste contexto, [84] [87], investigou a possibilidade de extrair-se Pd das PCB utilizando-se um pré-tratamento com oxidação em água supercrítica, seguido da adição de HCl (1 mol/L) e após essas duas etapas, as PCB foram lixiviadas por uma solução de iodeto-iodato. Neste estudo, foi obtida uma recuperação de 97,2% de Pd para as seguintes condições: pré-tratamento com água supercrítica a 420 °C, durante um período de 60 minutos a uma pressão de 33 MPa e a lixiviação sendo realizada a um pH 9. Outro estudo voltado para a extração de Pd utilizando oxidação em água supercrítica obteve uma recuperação de 85,9% [85].

3. Objetivos

3.1. Objetivo principal

Esta dissertação tem como objetivo analisar uma potencial fonte de lixo eletrônico que possa ser recuperado no país, criar uma rota conceitual integrando vários estudos da literatura, que viabilize a recuperação de componentes chave presentes na sucata eletrônica (e.g. Au, Cu, Ag, Pd) e analisar a viabilidade econômica do processo.

3.2. Objetivos secundários

- Determinar certos conhecimentos gerais da população sobre temas voltados a mineração urbana e economia circular;
- Avaliar a sensibilidade da rota proposta com variáveis de processo;

4. Análise da Contribuição do Estudo Realizado

No contexto apresentado, hoje no Brasil há o desafio, porém também a oportunidade de se reciclar o lixo eletrônico gerado no país. Como nenhum componente complexo deste tipo de lixo é tratado no país, toneladas de metais com alto valor agregado são exportados e/ou estão guardados ou imprópriamente descartados.

Assim como qualquer processo industrial, é crucial a avaliação da fonte de matéria prima, a criação do processo e a avaliação econômica do mesmo. Desta forma, avaliar a quantidade de lixo eletrônico apto a ser reciclado, como reciclar este lixo e, determinar sua viabilidade econômica torna-se de grande importância no cenário nacional.

Como apresentado nos itens anteriores, a quantidade de metais preciosos presentes nas PCB supera a concentração de qualquer minério presente na natureza, tornando qualquer local de descarte de lixo eletrônico uma fonte secundária de elementos como cobre, prata, ouro, paládio, entre outros metais. Porém, apesar de existir uma grande variedade de estudos tentando determinar tecnologias otimizadas para extração de metais específicos, falta no Brasil uma integração desses estudos para criação de uma rota, unindo várias tecnologias.

Adicionalmente, o Brasil sofre pela falta de incentivos governamentais voltados para gestão de lixo eletrônico e, para o tratamento em território nacional destes resíduos. Apesar de leis como a PNRS criarem uma base legal para o início de incentivos no tratamento dos resíduos eletrônicos, essas leis ainda não são realmente postas em prática. Neste contexto, o sistema de coleta no país é ainda ineficiente, sendo necessário a criação de uma logística robusta de coleta e incentivos para a população descartar corretamente equipamentos eletrônicos.

5. Manuscrito 1

On the Hibernating Electronic Waste in Rio de Janeiro Higher Education Community: An Assessment of Population Behavior Analysis and Economical Potential¹

Resumo: O Brasil é o segundo maior produtor de lixo eletrônico das Américas, com uma produção que cresce a cada ano e apenas 10% dela sendo tratada de forma apropriada. Além disso, dada a composição química típica desse tipo de resíduo, é possível recuperar metais valiosos, como cobre, ouro, prata e platina. Atualmente, o Brasil não possui uma planta industrial voltada para essa atividade extrativista a partir de resíduos eletrônicos, sendo a maior parte do seu tratamento realizado no exterior. A hipótese de pesquisa deste manuscrito é que as universidades e suas comunidades poderiam desenvolver fontes de matéria-prima para tais processos de extração e, portanto, merecem atenção para a criação de pontos de coleta e parcerias. Nesse contexto, é necessário entender o comportamento dessa comunidade em relação à aquisição, armazenamento e descarte de equipamentos eletrônicos, bem como informações sobre temas relacionados ao gerenciamento e reciclagem de resíduos eletrônicos. Para implementar esse estudo para a comunidade de ensino superior do Rio de Janeiro, foi criado um formulário com diversos temas sobre o assunto, que foi divulgado entre professores, alunos, funcionários e familiares das duas principais universidades estaduais. Determinou-se que o grupo estudado possui mais de 16,96 milhões de telefones celulares em hibernação, além de outros equipamentos, com valor de estoque estimado em US \$ 67,45 milhões para o grupo estudado na região metropolitana do Rio de Janeiro. Se extrapolado para todo o Brasil, pode chegar a US \$ 797,50 milhões para o grupo estudado. Essas informações serão utilizadas em projetos futuros para avaliar o potencial econômico de uma planta industrial dedicada à recuperação de metais no Brasil. No entanto, o presente estudo também identificou uma importante falta de conhecimento sobre a destinação adequada de resíduos e políticas de resíduos sólidos entre esse grupo bem-educado. Ficou claro que sem informações adequadas sobre pontos de coleta e conhecimento sobre como lidar com artefatos obsoletos, o acesso a essa fonte de matéria-prima poderia ser um entrave para futuros projetos de extração na área.

¹O presente manuscrito (DOI: 10.3390/su13169181) foi submetido a revista Sustainability no dia 30 de junho de 2021, aceito no dia 30 de julho de 2021 e publicado no dia 16 de agosto de 2021. As taxas de publicação foram custeadas pelo projeto FAPERJ “Apoio para publicações científicas em revistas qualificadas e de open access, priorizando a participação de alunos” (Edital 05/2020).

5.1. Introdução

Em 2019, a estimativa de geração de Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) para o ano de 2021 era de 52.2 milhões de toneladas de WEEE [1–3]. Porém, ao final daquele ano, esta estimativa já havia sido superada, onde foram gerados em 2019 cerca de 53.3 milhões de toneladas de sucata eletrônica [4]. Esta taxa de geração de lixo eletrônico representa de 3-5% da quantidade total de resíduos gerados no mundo [5–7] e somente 20% destes resíduos é propriamente tratada [3,8].

Quando analisada a composição, alguns equipamentos se sobressaem na concentração de metais com alto valor agregado, dentre os quais pode-se citar pequenos equipamentos eletrônicos como: celulares, computadores, tablets etc. [98]. A composição de metais presentes nesse tipo de equipamento é de 40 a 50 vezes maior que a concentração de depósitos naturais [14,99]. Dada essa elevada concentração de metais, a extração de componentes chaves presente em equipamentos sucateados requer apenas de 10% a 15% da energia utilizada na extração de metais em concentrados de minério [5,13]. Sendo assim, a reciclagem de lixo eletrônico é o ponto chave da mineração urbana, onde há um grande potencial para extração de materiais com valor econômico agregado, como metais preciosos e cobre [11,14–16]. Além disso, o uso dessa fonte secundária de metais também pode reduzir as emissões de gases de efeito estufa produzidos nos processos de extração [13], onde para o alumínio e o cobre, podem ser respectivamente economizadas até 95% e 85% da energia [35,62].

Considerando a progressiva relevância dos dispositivos eletrônicos na sociedade moderna e a constante atualização e renovação dos gadgets pessoais da população, pode-se observar que o estoque de WEEE está aumentando formando uma ocorrência urbana comparável às de minas em termos de massa acumulada [100]. Através da mineração urbana, pode-se reduzir a demanda por fontes primárias de metais, reduzindo assim impactos ambientais pela mineração extrativa. Esta redução traria impactos positivos ao meio ambiente, uma vez que a mineração é comumente conhecida como uma atividade não sustentável, a qual traz riscos ambientais, tais como contaminação do meio por agentes químicos, desmoronamento de barragens etc. [13,35,61,99]. Isso é particularmente especial considerando que a mineração é uma atividade majoritariamente conduzida em áreas da população vulnerável, como países menos desenvolvidos e em desenvolvimento.

Neste contexto, o Brasil é o segundo maior gerador de lixo eletrônico nas américas, tendo aumentado em mais de 100% sua geração de 2016, a qual era entorno de 900 mil toneladas [9,23] para mais de 2 milhões de toneladas em 2019 [4] e um local

vulnerável ao despejo de lixo eletrônico [99]. Porém, mais de 90% de todo esse REEE ainda não é tratado adequadamente, principalmente pela falta de investimentos financeiros no desenvolvimento de áreas industriais locais para processamento químico e também pela necessidade de educação ambiental para uma população com uma diversidade social - econômica [2,9], mesmo com a criação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS) [54,99], a qual tem o intuito de reduzir a geração de resíduos e aumentar o reuso e reutilização de produtos, inclusive de resíduos eletrônicos [9,23]. Após 11 anos da PNRS, um trabalho árduo deve ser desenvolvido no Brasil para atualizar sua eficácia nas diferentes gerações de resíduos sólidos. Falta ainda construir a logística reversa de coleta no país, bem como o estudo para determinar os locais com alta geração de WEEE para criar um sortimento amplo e eficaz de pontos de coleta que devem ser bem conhecidos em geral. Alguns estudos já tentaram estabelecer possíveis locais para a implantação de pontos de coleta como a obra de Alves et al., 2021 [101], o qual investigou, através de um questionário, questões relacionadas com conhecimento básico e descarte de WEEE entre a população da cidade de São João Del Rei e determinou que 97% da população estava disposta a aprender em como descartar corretamente o e-waste. Ottoni et al., 2020 [12], analisou a geração de WEEE na região metropolitana do Rio de Janeiro, assim como possíveis pontos de coleta. Porém, este estudo levou em consideração a geração total de WEEE, não diferenciando os equipamentos descartados, assim como não distinguiu a geração de WEEE entre diferentes classes sociais.

Com base nessa perspectiva, pode-se considerar a investigação de possíveis grupos que tenham alto potencial para consumir equipamentos eletrônicos e, assim, gerem um grande percentual de REEE como premissa válida. [102]. Por exemplo, o trabalho baseado em estudantes universitários chineses feito por Ling Zhang et al., 2019 [98], no qual foi estimado que na China há US \$ 1,6 bilhão em metais em equipamentos em hibernação pertencentes a alunos do segmento de ensino superior. [7] [7], concluiu que em todo o mundo existe uma tendência de armazenar aparelhos eletrônicos antigos em casa. Verificou-se que, em alguns países, cerca de 85% desses dispositivos acabam sendo armazenados sem perspectiva de serem reciclados. Nesse contexto, é necessário determinar a quantidade de equipamentos armazenados em casa no Brasil. Nesse contexto, os objetivos do presente manuscrito estão associados o estudo do comportamento de um segmento social brasileiro em termos de comportamento de consumo, descarte e hibernação relacionado a dispositivos amplamente utilizados. A análise foi realizada por meio de um questionário eletrônico, onde a quantidade de equipamentos em hibernação foi avaliada como primeira etapa na avaliação do potencial econômico da reciclagem como alternativa à questão dos WEEE no Brasil.

Seguindo a abordagem proposta por Zhang et al., 2019 [98], a presente pesquisa foi realizada com membros da comunidade de ensino superior composta por alunos, professores e funcionários da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio) e da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), além de familiares membros e pessoas próximas a eles. Adicionalmente, a pesquisa analisou os conhecimentos gerais do grupo analisado sobre a reciclagem de lixo eletrônico e os temas da economia circular como ferramenta para compreender como a população mais escolarizada entende o assunto. Finalmente, os resultados quantitativos do estoque de hibernação, valor econômico e características de WEEE, e o entendimento geral do grupo qualitativo foram usados para traçar uma visão geral do potencial de estabelecer pontos de coleta em tais áreas, com base na comparação com os dados relatados para os estudantes universitários chineses.

5.2. Metodologia

5.2.1.

Design do questionário

Este trabalho consistiu de uma pesquisa através de um questionário. O questionário foi construído através do auxílio de um formulário eletrônico, dividido em quatro partes:

- Perfil do participante,
- Situação dos dispositivos em uso,
- Situação dos aparelhos que estão em hibernação e as possíveis razões para os participantes descartarem ou não os dispositivos,
- Conhecimentos gerais dos participantes em relação às etapas de coleta e reciclagem de WEEE.

A primeira parte, buscou avaliar o perfil dos participantes, através de perguntas voltadas para a localização do participante, sexo, faixa etária, grau de escolaridade e números de residentes no lar. A segunda etapa consistiu em determinar o número de aparelhos eletrônicos em uso, assim como os principais motivos para aquisição de novos dispositivos. A terceira parte englobando cinco perguntas, buscou determinar: 1) Quantidade de aparelhos em hibernação, 2) Tempo de hibernação, 3) Motivos pelos quais os aparelhos deixam de ser usados, 4) Motivos pelos quais os aparelhos são mantidos guardados e 5) Possíveis opções para descarte. E por fim, a última parte estudou os conhecimentos dos participantes sobre tópicos referentes à Política Nacional

de Resíduos Sólidos (PNRS), mineração urbana, economia circular, perigos do lixo eletrônico, pontos de coleta e se os participantes conheciam alguma empresa especializada na coleta de e-waste.

A pesquisa foi distribuída entre universitários e familiares da Faculdade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Os dispositivos eletrônicos estudados pela pesquisa foram: smartphones (MP), celulares antigos (OMP), tablets (TPC), notebook (LPC), desktop (DPC), vídeo games (VG) e MP3 players ou similares (MP3P). Estes equipamentos foram escolhidos uma vez que são usualmente dispositivos muito utilizados, tendo a maioria sido considerada os dispositivos mais utilizados pela população brasileira por [100] [103].

Todas as perguntas que possuíam motivos de aquisição, hibernação, descontinuação do uso e descarte possuíam o design de resposta por nível de concordância de cada participante com cada tópico. As pontuações de cada resposta foram distribuídas em uma escala de 1 a 5 pontos, no qual o menor valor está associado a resposta de “discordo totalmente” e o maior valor “concordo totalmente”, seguindo a metodologia utilizada por Zhang et al. 2019 [98].

5.2.2.

Amostragem e distribuição do questionário

O grupo analisado nesta pesquisa foi tanto a população universitária, i.e., alunos, docentes e funcionários, assim como familiares e pessoas próximas da população universitária. Uma vez que não seria possível ter precisão do número da população analisada, uma vez que faltam dados estatísticos, foram considerados os números presentes no Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais (Inep) referentes a toda a população universitária do estado do Rio de Janeiro. Como já informado, a pesquisa foi difundida em duas das principais universidades do estado: a UFRJ e a PUC-Rio.

A pesquisa foi conduzida entre setembro de 2020 até novembro de 2020. O questionário ficou disponibilizado na plataforma *Google Forms*, e seu link foi divulgado em grupos de pesquisa e de alunos das duas universidades e, foram consideradas somente as respostas de residentes da região metropolitana do Rio de Janeiro.

5.2.3. Resultados

5.2.4.

Perfil da comunidade universitária do Rio de Janeiro

No total, foram obtidas 551 respostas, das quais 429 eram válidas. Como foi considerado um tamanho de população de 792391 [104], o tamanho mínimo de amostragem é de 384 assumindo um intervalo de confiança de 95%, com valor de desvio padrão igual a 0.5 e uma margem de erro de 5%. Sendo assim, pode-se afirmar que o número de respostas válidas é suficiente para o tamanho da população.

Com relação a primeira etapa de identificação do perfil do usuário, dos 429 participantes válidos, 52% eram homens e 48% mulheres, o que se correlaciona relativamente bem com os dados de 2019 publicados pelo Inep, no qual 44% dos alunos e funcionários das universidades eram homens e 56% mulheres [104]. Adicionalmente, 42% dos entrevistados possuem entre 20 e 30 anos, enquanto que pelos dados do Inep, o número de estudantes nesta faixa etária é de 60%. Os dados estatísticos do Inep só levam em consideração a faixa etária dos estudantes, excluindo funcionários, sendo assim, existe uma pequena diferença entre os dados da pesquisa com os dados da literatura, que muito possivelmente é devida a falta de dados da faixa etária de funcionários e docentes. A diferença entre os dados, ainda pode ser devida às premissas realizadas na metodologia. A percentagem de entrevistados com grau de escolaridade completo, que possuíam pós graduação foi de 45%, enquanto que para Graduação, Ensino Médio e Nível Técnico foram de 25%, 20% e 10% respectivamente. Na pergunta sobre “Quantas pessoas moram na mesma residência”, 35% dos entrevistados responderam 3 pessoas, 25 % com 2 e 21% com 4. Todos os dados do perfil dos participantes estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Perfil do participante com base no gênero, nível de escolaridade, idade e número de pessoas que vivem na mesma residência.

Característica	Categoria	Número de candidatos (%)
Gênero	Masculino	221 (52%)
	Feminino	206 (48%)
	Não declarado	2 (0%)
Grau de escolaridade	Ensino Fundamental	1 (0%)
	Ensino Médio	88 (20%)
	Graduação	107 (25%)
	Nível Técnico médio	42 (10%)
	Pós-Graduação	191 (45%)
Faixa etária	Menos de 20 anos	10 (2%)
	20 – 30 anos	179 (42%)
	30 – 40 anos	100 (23%)
	40 – 50 anos	48 (11%)
	50 – 60 anos	37 (9%)
	60 – 70 anos	50 (12%)
Número de pessoas que moram na mesma residência	Menor que 20 anos	5 (1%)
	1	34 (8%)
	2	116 (27%)
	3	150 (35%)
	4	91 (21%)
	5	27 (6%)
	Mais que 5	11 (3%)

5.2.5.

Característica dos dispositivos eletrônicos em uso

Os resultados obtidos referentes à quantidade de aparelhos em uso estão apresentados na Tabela 5 e Figura 1.

Tabela 5. Uso de dispositivos entre o meio acadêmico do Rio de Janeiro e comparação com a população brasileira e estudantes chineses da província de Jiangsu.

Tipo de aparelho	Unidades per capita da pesquisa	Unidades per capita no Brasil em 2020a	Unidades per capita de estudantes universitários em Jiangsu, China ^b	Unidades per capita na China ^c
MPs	2.2	1.09	1.19*	2.24*
OMP	0.7	NA	1.19*	2.24*
TPC	0.7	0.16	0.42	
DPC	0.6	0.42	0.41	
LPC	1.7	0.34	0.97	0.55
VG	0.5	NA	NA	
MP3P	0.4	NA	NA	

a: data obtained from Meirelles 2020 [103]

b: data obtained from Zhang et al. 2019 [98].

c: data obtained from National Bureau of Statistics of China 2016 [105].

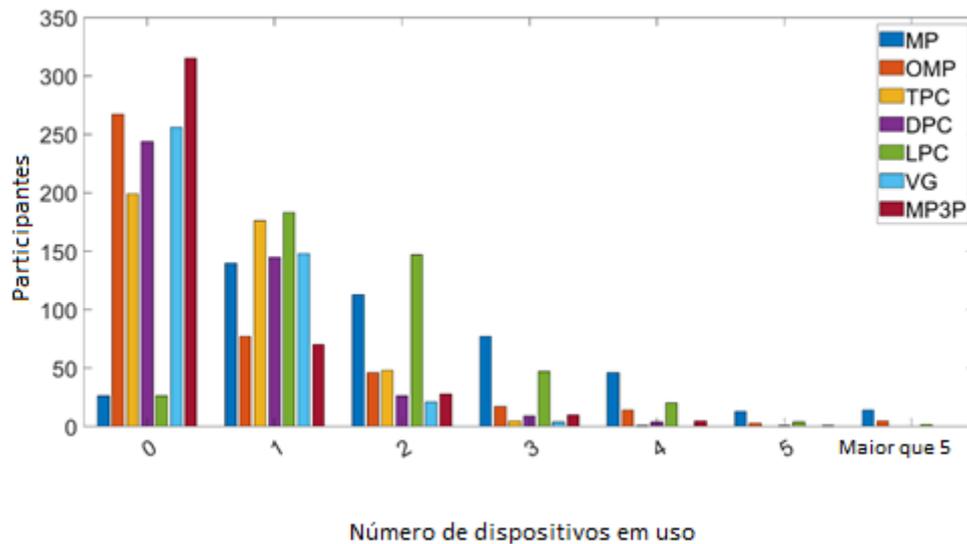


Figura 1. Resultado da pesquisa em relação ao número de aparelhos eletrônicos em uso (Retirado e adaptado de d'Almeida et al. 2021 [10]).

Pode ser observado que o aparelho eletrônico mais utilizado é o MP, com 2.2 unidades per capita. Esse valor é maior que o dobro da média nacional, a qual apresenta 1.09 unidades de MP per capita [103], indicando que algum tipo de concentração de aparelhos eletrônicos está ocorrendo nas camadas mais educadas e abastadas da sociedade. O fato de os smartphones serem os dispositivos mais utilizados está de acordo com as tendências mundiais, visto que é cada vez mais necessário para a sua utilização nas diferentes tarefas do dia a dia. Outras pesquisas já mostraram que esses dispositivos são de fato os mais populares atualmente [98,106].

A utilização de LPC é também altamente superior ao restante dos aparelhos avaliados, com uma utilização per capita de 1.7 unidades, muito superior à média nacional de 0.34 unidades per capita. Este fato pode ser explicado pela cada vez maior necessidade da utilização de ferramentas digitais no dia a dia da universidade e de carreiras de nível superior. Considerando as condições de ensino a distância estabelecidas com a pandemia do SARS-CoV-2 e os incentivos à doação de equipamentos para os alunos e trabalhadores mais vulneráveis à inclusão digital, esse resultado pode ser ainda maior em breve. A utilização de TPC e DPC são também maiores que as médias nacionais, mostrando que há uma demanda para este tipo de aparelho entre o grupo avaliado. Os outros aparelhos avaliados pela pesquisa não possuem uma avaliação nacional, porém pode-se perceber que a utilização de OMP ainda é relativamente popular, porém bem inferior ao uso de MPs e, o uso de VG e MP3P foi inferior quando comparado com os outros aparelhos.

Extrapolando os dados obtidos com esta pesquisa, levando em consideração os estudantes universitários, docentes e técnicos de Universidades do Estado do Rio de Janeiro, a quantidade de equipamentos em uso atualmente seria de aproximadamente: 1,72 milhões de MP, 0,59 milhões de OMP, 0,54 milhões de TPC, 0,42 milhões de DPC, 1,35 milhões de LPC, 0,37 milhões de VG e 0,33 milhões de MP3P.

Como já apresentado, a posse de aparelhos eletrônicos do grupo avaliado é maior do que a média nacional, como observado na Tabela 5. Este fato pode ser entendido pela necessidade de acesso à informação e tecnologia, no qual as universidades e as empresas demandam. Ou, ainda pode ser entendido que a educação superior no Brasil tende a atrair a população com maior poder aquisitivo, que usualmente consome mais eletrônicos.

A presente pesquisa parte da premissa de que as universidades podem ser grandes fornecedoras de equipamentos eletrônicos de informática para processos de extração e, portanto, merecem atenção para a criação de pontos de coleta para este tipo de resíduos e parcerias.

Comparando os resultados com os de Zhang et al., 2019 [98], o qual fez uma pesquisa parecida, porém voltada somente para estudantes universitários da província de Jiangsu, China, percebe-se que o grupo estudado por este trabalho utiliza mais equipamentos eletrônicos. Este fato pode estar associado a 3 hipóteses: 1) Estudantes chineses consomem menos equipamentos eletrônicos do que universitários brasileiros, 2) O corpo técnico e docente das universidades brasileiras tem um consumo exagerado desses equipamentos, fazendo com que o número de unidades per capita da pesquisa seja maior, ou 3) A combinação de algumas das duas proposições anteriores. Adicionalmente, comparando os resultados da pesquisa com o cenário presente na China, percebe-se que diferente da tendência Chinesa, onde a população universitária possui menos equipamentos que a média nacional, o grupo analisado neste estudo possui mais equipamentos que a média nacional, como já citado. Este fato pode estar de acordo com o fato, já citado, de que a educação superior brasileira costuma atrair a população com maior poder aquisitivo.

5.2.6.

Quantidade em hibernação

Na Tabela 6 estão apresentados os números de aparelhos em hibernação per capita. Como pode ser observado, os MPs são o grupo com maior número de unidades, seguindo o mesmo padrão de outras pesquisas em outros países [98]. O OMP possui números relevantes, porém inferiores aos MP. Os demais aparelhos eletrônicos possuem uma quantidade per capita baixa.

Tabela 6. Unidades per capita de dispositivos em hibernação no grupo avaliado em comparação com estudantes chineses.

Tipo de aparelho	Unidades per capita da pesquisa	Unidades per capita entre estudantes chineses ^a
MPs	1.1	0.83
OMP	0.8	0.83
TPC	0.3	0.06
DPC	0.2	0.19
LPC	0.6	0.14
VG	0.3	NA
MP3P	0.5	NA

a: data obtained from Zhang et al. 2019

Quando comparados os dados da pesquisa com os do trabalho de Zhang et al., 2019 [98], percebe-se que o grupo avaliado por esta pesquisa possui uma quantidade per capita superior de aparelhos em hibernação. Este fato pode demonstrar que, assim como a população chinesa avaliada, a população brasileira avaliada é também uma possível fonte de equipamentos eletrônicos para recuperação de materiais.

Extrapolando os dados obtidos com esta pesquisa, considerando-se o número da população avaliada e, considerando-se os valores per capita apresentados na Tabela 6. É possível estimar que a quantidade aproximada de aparelhos eletrônicos em hibernação no Rio de Janeiro para o grupo analisado é de: 0,84 milhões de MP, 0.60 milhões de OMP, 0.26 milhões de TPC, 0,16 milhões de DPC, 0,46 milhões de LPC, 0,23 milhões de VG e 0,39 milhões de MP3P.

Como pode ser observado na Figura 2 a maior parte dos equipamentos são guardados por 3 anos ou mais, indicando que há uma falta de iniciativa para a reciclagem deste tipo de lixo, tornando importante entender quais foram os fatores que levaram ao acúmulo destes equipamentos nas residências dos entrevistados. Adicionalmente, este tempo de hibernação de 3 anos ou mais também ocorre em outras populações universitárias, como a chinesa [98] ou a da Grã-Bretanha [107], demonstrando uma possível tendência mundial.

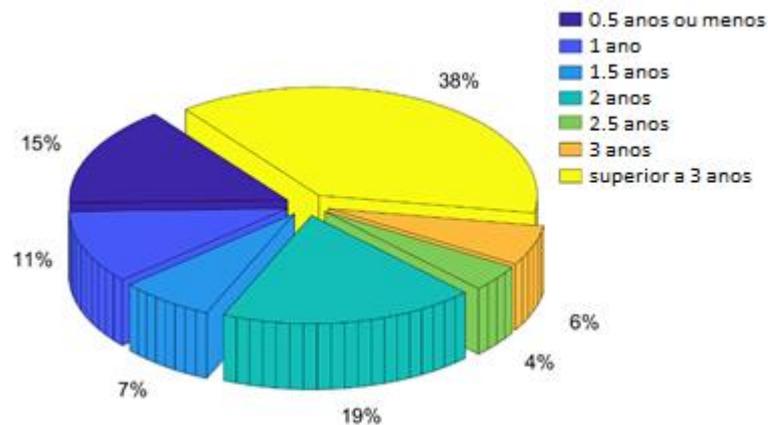


Figura 2. Tempo de hibernação dos dispositivos no Rio de Janeiro (Retirado e adaptado de d’Almeida et al. 2021 [10]).

5.2.7.

Razões para obsolescência/troca de aparelhos

As respostas referentes aos motivos da troca, obsolescência e aquisição de novos aparelhos, bem como os motivos pelos quais os aparelhos foram armazenados e não descartados, são apresentadas a seguir.

Neste contexto, na Figura 3, o motivo com maior significância dentre as quatro avaliados, para a aquisição de novos dispositivos, foi o relacionado a adequação as demandas profissionais atuais, com 28% das respostas.

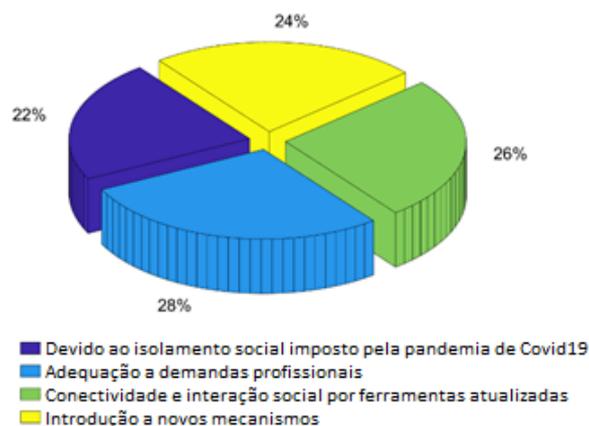


Figura 3. Motivos para a aquisição de novos dispositivos entre os entrevistados (Retirado e adaptado de d’Almeida et al. 2021 [10]).

Este fato indica que a população universitária tende a se comportar pois necessita estar em constante atualização tecnológica para fazer frente à crescente demanda como novos requisitos de software além da demanda de uso de novos hardwares que

requerem mais memória e capacidade de processamento. [2]. Esse motivo também foi o motivo mais importante para a aquisição de novos dispositivos entre os estudantes chineses [98]. O segundo e o terceiro motivos com maior significância foram relacionados à conectividade e interação por meio de ferramentas mais atualizadas e lazer pessoal, respectivamente. Esse fato mostra a busca por novas tecnologias de uso pessoal, e assim como no caso do primeiro motivo, novos dispositivos tendem a ter novas funcionalidades e melhores especificações, levando à sua aquisição. O motivo que menos influenciou os participantes da pesquisa foi a questão do isolamento social imposto pela pandemia do SARS-CoV-2. Porém, este motivo teve 22% dos votos, mostrando que as respostas foram bem equilibradas e, indicando que talvez a pandemia de SARS-COV2 tenha aumentado os hábitos de consumo de equipamentos eletrônicos do grupo em questão. Vale ressaltar, que os motivos “Adequação as demandas profissionais atuais” e “Conectividade e interação social por meio das ferramentas atualizadas”, os quais estão relacionados a obsolescência dos equipamentos, apresentam somados 54% das respostas válidas.

Por outro lado, na Figura 4 mostra as respostas aos motivos pelos quais os aparelhos deixaram de ser usados e, como pode ser verificado, em que três motivos respondem por 27% das respostas cada.

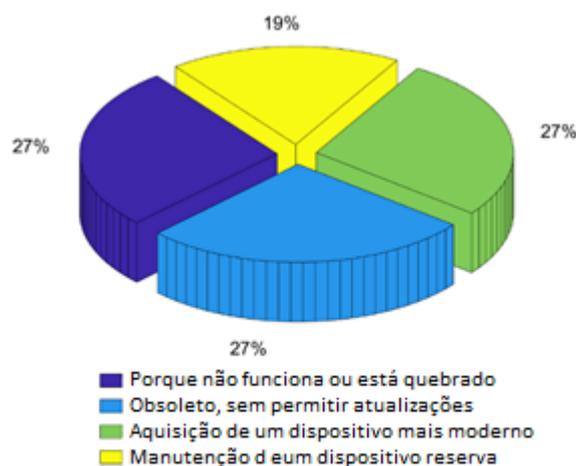


Figura 4. Motivos para os dispositivos terem sido substituídos (Retirado e adaptado de d’Almeida et al. 2021 [10]).

Além do fato de dispositivos danificados não serem mais utilizados, dispositivos obsoletos que deixaram de receber atualizações e a troca por dispositivos mais modernos são fortes motivos para a hibernação dos dispositivos. Além disso, a dificuldade de acesso a peças de reposição para consertar aparelhos danificados também pode dificultar seu reaproveitamento e acelerar sua reposição. O motivo de menor significância, com apenas 19% das respostas, foi porque o aparelho foi utilizado

como backup. Esse dado pode ser explicado por um grande número de furtos e roubos associados a MP no Rio de Janeiro. Por exemplo, 42 mil telefones celulares foram roubados no estado brasileiro do Rio de Janeiro em 2018 [108]. Isso poderia levar, talvez, à consolidação do comportamento de ter um dispositivo sobressalente. Diante desses resultados, as respostas obtidas nesta questão corroboram com as anteriores, onde a população universitária do Rio de Janeiro tende a deixar de usar os aparelhos por questões de obsolescência ou por haver novos modelos no mercado. Pode ser observado, na Figura 5, que a principal razão de manter os equipamentos antigos se deve à falta de local apropriado para o descarte (e uma política pública de incentivo ao descarte), de fato, a razão de “não saber como descartar de forma apropriada” ficou em segundo lugar, empatada com a “manutenção de um aparelho reserva”.

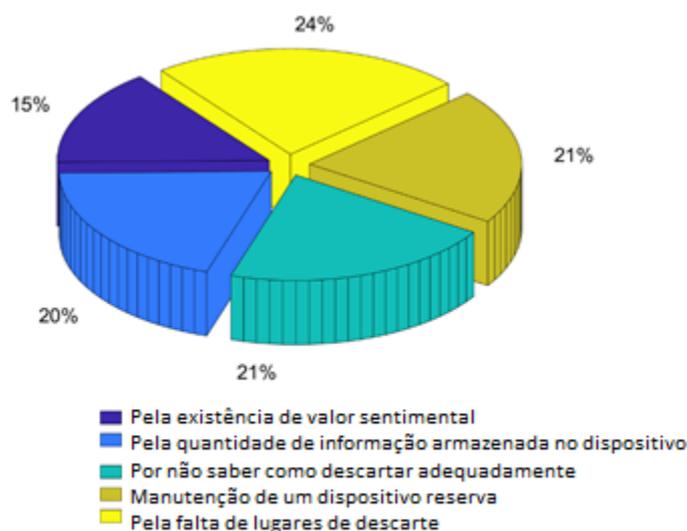


Figura 5. Motivos pelos quais os entrevistados mantêm os dispositivos guardados (Retirado e adaptado de d'Almeida et al. 2021 [10]).

A pesquisa então indica que existe uma desinformação referente ao descarte de lixo eletrônico, seja ela causada por faltas de incentivos governamentais ou econômicos. Uma vez que o grupo analisado é, em teoria, um dos grupos com maior conhecimento científico do país, pode-se considerar que para o Brasil como um todo, a falta de desinformação no descarte de lixo eletrônico é possivelmente muito maior. Quando comparada com a pesquisa de Zhang et al., 2019 [98], percebe-se algumas semelhanças nas respostas entre os dois grupos analisados, uma vez que 22% dos estudantes chineses não descartaram seus equipamentos pela falta de local apropriado, em comparação com 24% do grupo brasileiro. Indicando que a falta de estrutura de descarte não é um problema exclusivo do Brasil e sim uma tendência mundial. A preocupação com dados e privacidade pode ser observada, uma vez que 20% dos

entrevistados não descarta seus dispositivos por eles conterem informações armazenadas, motivação que também preocupa 20.7% dos estudantes chineses [98]. Uma possível forma de reduzir esta razão, seria a de ensinar como retirar as informações pessoais contidas nos aparelhos, assim como descrito por Zhang et al., 2019 [98]. A razão com menor influência para a hibernação dos dispositivos foi a de “valor sentimental”, possivelmente mostrando que a falta de incentivos e informação com descarte e outros detalhes técnicos são os fatores que devem ser trabalhados para um maior descarte de lixo eletrônico.

Ainda assim, é possível perceber outras semelhanças entre este estudo e o de Zhang et al., 2019 [98], uma vez que a resposta sobre “Manutenção de um aparelho reserva”, é facilmente entendida como sendo uma opção de maior conveniência, por motivos culturais já explicados. Sendo assim, comparando com os chineses, percebe-se que a pesquisa brasileira teve 21% das respostas em comparação com 22.1% da chinesa.

Como pode ser observado na Figura 6, quando indagados em como descartariam os dispositivos, 25% dos entrevistados estariam dispostos a entregar para uma empresa especializada na coleta de lixo eletrônico.

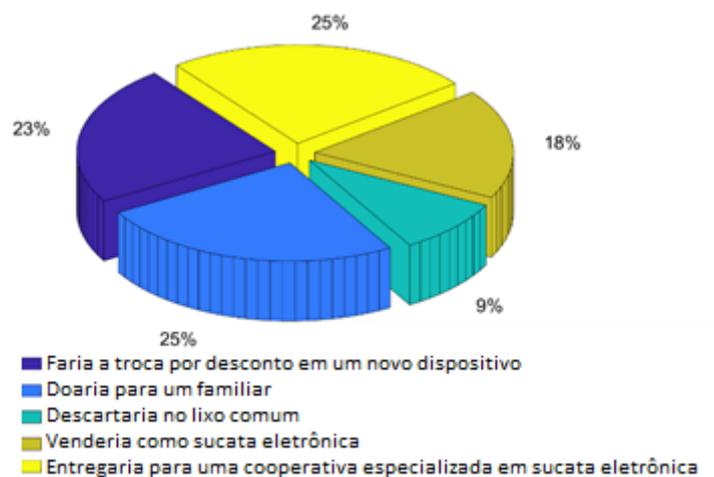


Figura 6. Opiniões dos participantes sobre como eles lidariam com as opções de descarte de dispositivos obsoletos (Retirado e adaptado de d’Almeida et al. 2021 [10]).

Observa-se também que 25% dos entrevistados doariam o dispositivo para familiares, demonstrando que a reutilização de equipamentos acontece entre a população universitária do Rio de Janeiro. A terceira opção de descarte seria através da troca do aparelho por desconto em um outro, prática recorrente entre os fabricantes, de modo a incentivar a reutilização dos aparelhos. Uma parcela de 18% ainda está disposta a

vender seus equipamentos antigos, um percentual pequeno se comparado a países como a Finlândia [7]. Adicionalmente, uma parcela pequena, de 9% realizaria o descarte em lixo comum, indicando que mesmo no meio universitário, é necessária a conscientização do descarte em locais adequados. Porém, quando comparado com a pesquisa de Alves et al., 2021 [101], a qual 43.5% dos entrevistados descartaria em um lixo inapropriado, percebe-se que o grupo analisado por esta pesquisa possui um maior discernimento quanto ao descarte de equipamentos eletrônicos.

5.2.8.

Conhecimentos Gerais do Grupo de estudo

Nas perguntas de conhecimento geral, com os resultados apresentados na Figura 7, no qual foi observado que 58% dos participantes não possuem conhecimento sobre a PNRS, demonstrando que devido a fatores como a falta de políticas de conscientização no Brasil, mesmo no meio acadêmico, que a lei que regulamenta o correto descarte de eletrônicos os resíduos não são devidamente disseminados entre a população.

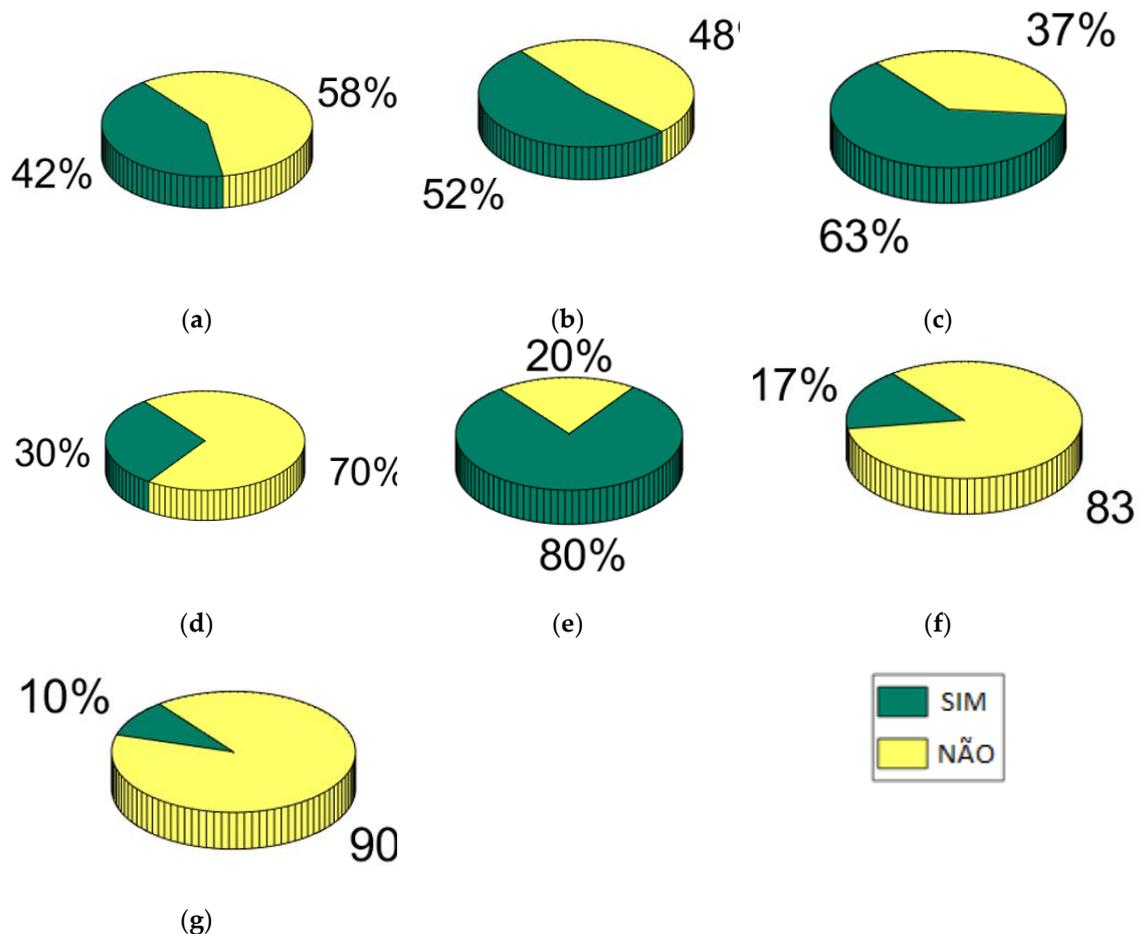


Figura 7. Resultado das perguntas de conhecimento geral, onde: a) Possui algum conhecimento sobre a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei Federal nº 12.305 de 2010)?; b) Já ouviu falar em logística reversa de resíduos eletrônicos?; c) Já ouviu falar em Economia Circular?; d) Já ouviu falar em Mineração

Urbana?; e) Tem conhecimento sobre a periculosidade de algum tipo de resíduo eletrônico?; f) Na sua localidade de moradia existem pontos de coletas para este tipo de material?, g) Conhece alguma empresa de coleta de resíduos eletrônicos? (Retirado e adaptado de d'Almeida et al. 2021 [10]).

A falta de conhecimento torna-se ainda mais concreta quando são analisadas as respostas referentes ao conhecimento dos participantes sobre logística reversa de resíduos eletrônicos, onde 48% dos participantes nunca ouviram falar do tema, mesmo ele sendo obrigatório pelas empresas, conforme o prevê o acordo setorial, legislado pelo Decreto 10.240 de 2020 [109]. Outro ponto chave da reciclagem de lixo eletrônico, foi a Mineração Urbana que é desconhecida pela maior parte do meio acadêmico, uma vez que 70% das respostas foram negativas na pergunta “Já ouviu falar de Mineração Urbana”. Uma vez que se o meio acadêmico não conhece este termo, é possível argumentar que o conhecimento sobre Mineração Urbana de um brasileiro comum, deve ser ainda menor que 70% da população. Apesar das respostas negativas, 63% dos entrevistados já ouviram falar sobre economia circular, mostrando que apesar de não terem total conhecimento do assunto, vários participantes tem alguma noção, mesmo que parcial, do tema de tratamento de resíduos eletrônicos. Quando perguntados sobre conhecimentos da periculosidade do lixo eletrônico, 80% dos entrevistados responderam que tinham algum conhecimento. Provavelmente este número elevado é devido aos conhecimentos sobre os malefícios e os danos que podem ser causados pelo incorreto descarte de pilhas e baterias os quais são amplamente difundidos na mídia a anos. como pode ser observado também pelos dados obtidos por Alves et al., 2021 [101].

As perguntas finais da pesquisa foram voltadas para pontos de coleta e empresas especializadas, no qual 83% das localidades de residência dos entrevistados não possui um ponto de descarte para este tipo de resíduo. Adicionalmente, apenas 10% dos participantes conhece alguma empresa especializada na coleta de lixo eletrônico. Ainda é necessário notar que 33% das companhias mencionadas pelos participantes não eram realmente especializadas em coleta, e sim em remodelar os equipamentos para venda. As duas principais empresas citadas foram a Tech Trash - Zyklus e E-lixo, onde somadas representaram 78% das respostas válidas.

A partir do conhecimento geral dos participantes, pode-se sugerir que no Brasil falta a disseminação do conhecimento sobre as práticas ambientais e a aplicação de políticas públicas que incentivem a destinação correta do lixo eletrônico. Ainda é preciso reafirmar que em duas das mais destacadas comunidades acadêmicas do Rio de Janeiro, que integram o grupo de maior escolaridade da sociedade, o conhecimento básico sobre a gestão e a conscientização da reciclagem de aparelhos eletrônicos é deficiente. Portanto, pode-se deduzir que a média brasileira sobre esse conhecimento

deve seguir a mesma tendência ou, muito provavelmente, ser inferior à da presente pesquisa. Portanto, há a necessidade de criar formas de disseminar o conhecimento sobre a gestão de WEEE, tomando como modelo países que têm tido sucesso nesse quesito, como a Noruega e a Dinamarca. [16].

5.3. Discussão

Sabe-se que os dispositivos avaliados na pesquisa possuem elevada fração mássica de metais [36], podendo possuir concentrações até 50 vezes superiores que a de minérios específicos do metal. Neste contexto, é possível estimar a quantidade de recursos com alto valor agregado e que poderiam ser recuperados dos equipamentos em hibernação. Adicionalmente, baseado nos resultados da pesquisa, pode-se estimar que a quantidade de aparelhos eletrônicos em hibernação de alunos e funcionários de todas as universidades do país seria de: 9.91 milhões MP, 7.05 milhões OMP, 3.08 milhões TPC, 1.94 milhões DPC, 5.44 milhões LPC, 2,73 milhões VG and 4.59 milhões MP3P (estimado a partir do número total de alunos e funcionários do ensino superior do Brasil, retirado de Inep [104]).

Para estimar-se a quantidade de recursos presente nos equipamentos em hibernação, considerou-se os valores de composição presentes na Tabela 7 e os pesos médio presentes na Tabela 8. Devido as semelhanças tecnológicas, considerou-se a composição dos TPC como sendo as dos MP. Adicionalmente, [107] [110], analisou a composição de PCB de OMP e MP e os resultados encontrados indicavam que a composição dos dois equipamentos era parecida, onde os OMP possuíam uma concentração um pouco menor de elementos raros. Neste contexto, no presente trabalho, considerou-se a composição de OMP como sendo aproximadamente a de MP.

Tabela 7 - Valores médios de composição de metais nos equipamentos analisados.

Dispositivo	kg por ton de equipamento										Referência	
	Au	Ag	Pd	In	Cu	Fe	Ni	Sn	Sb	Co		
MP												
OMP	0.347	3.63	0.15	1.102	128	50	15	10	1	16	[49,65,111,112]	
TPC												
DPC	0.06	0.30	0.025	0.04	72	180					[49]	
LPC	0.032	0.19	0.019	0.14	57	200				10.7	[49]	
VG*	2.5	17	0.4		10	430					[113,114]	
MP3P		1	0.1		29	397					[113,114]	

Tabela 8 - Pesos médios considerados neste trabalho.

Dispositivo	Massa considerada [kg]	Referência
MP	0.10	[49]
OMP	0.197	[115]
TPC	0.50	[26]
LPC	1.86	[49]
DPC	10.56	[116]
VG	0.50	[113]
MP3P	0.22	[49]

O trabalho de Zhang et al., 2019 [98], considerou que uma unidade de MP possuía 1 kg, usando o trabalho de Ongondo et al. 2011 [46] e Zeng et al. 2016 [49]. Possivelmente esta estimativa de massa está muito fora da realidade, uma vez que após pesquisa de alguns dos equipamentos MP comuns no mercado, constatou-se que sua massa varia de 0.10 – 0.2 kg. Após análise da *supporting information* (SI) de Zeng et al., 2016, constatou-se que a massa média dos MP considerada por Zeng et al., 2016 [49], constatou-se que a massa média do MP considerado foi de fato 0,10 kg, o que foi considerado no presente estudo. Como pode ser observado na Tabela 9 e Tabela 10

Tabela 9. Massa estimada de metais presentes em equipamentos eletrônicos em hibernação entre o grupo analisado no estado do Rio de Janeiro.

Dispositivos	Tonelada de metal									
	Metais preciosos				Outros metais					
	Au	Ag	Pd	In	Cu	Fe	Ni	Sn	Sb	Co
MP	0.029	0.304	0.013	0.092	10.73	4.19	1.26	0.84	0.08	1.34
OMP	0.041	0.427	0.018	0.130	15.04	5.88	1.76	1.18	0.12	1.88
TPC	0.045	0.474	0.020	0.144	16.67	6.51	1.95	1.30	0.13	2.08
DPC	0.018	0.092	0.008	0.012	22.01	55.04				
LPC	0.155	0.923	0.092	0.680	276.84	971.35				51.97
VG	0.289	1.963	0.046		1.15	49.64				
MP3P		0.085	0.009		2.48	33.88				
Total	0.577	4.266	0.204	1.058	344.92	1,126.5	4.97	3.32	0.33	57.27

Tabela 10. Massa estimada de metais presentes em equipamentos eletrônicos em hibernação entre estudantes universitários e funcionários de universidades no Brasil.

Dispos- -itivos	Toneladas de metal									
	Metais preciosos				Outros metais					
	Au	Ag	Pd	In	Cu	Fe	Ni	Sn	Sb	Co
MP	0.344	3.599	0.149	1.093	126.9	49.6	14.9	1.0	1.0	15.9
OMP	0.482	5.044	0.208	1.531	177.9	69.5	20.8	13.9	1.4	22.2
TPC	0.534	5.589	0.231	1.697	197.1	77.0	23.1	15.4	1.5	24.6
DPC	0.217	1.085	0.090	0.145	260.3	650.7				
LPC	1.838	10.911	1.091	8.039	3,273.2	11,485				614.4
VG	3.412	23.204	0.546		13.7	586.9				
MP3P		1.009	0.101		29.3	400.6				
Total	6.83	50.44	2.42	12.51	4,078	13,319	58.8	39.2	3.9	677.2

Considerando as informações de preços obtidas por Zeng et al. 2016 e Arshadi, Yaghmaei, and Mousavi 2018 [19,49], o valor total contido nos equipamentos em hibernação no país, considerando apenas o grupo estudado, é de USD 797.5 milhões. É válido de nota que os metais preciosos representam 90.7% de todo o valor, neste contexto, é observado que os aparelhos MP, OMP, TPC e VG possuem a maior concentração destes elementos, sendo assim possível traçar rotas de coleta e processamento específicas para estes equipamentos. Através da Tabela 4, percebe-se que a média de indivíduos morando na mesma residência que o entrevistado é de 3 habitantes. Desta forma, pode-se extrapolar os dados obtidos e estimar-se que considerando o perfil de consumo entre os habitantes da casa como sendo muito parecidos, há no Brasil USD 2.39 bilhões em metais.

5.4. Conclusão

A presente pesquisa verificou que grande parte da comunidade vinculada a duas instituições de ensino superior do Rio de Janeiro não possui conhecimento formal sobre o que toca as políticas de resíduos sólidos. No entanto, tiveram contato com conceitos de economia circular e informações de conscientização sobre o lixo eletrônico. Sem informações claras sobre os pontos de coleta, próximos à residência ou trabalho, e informações para lidar com materiais obsoletos, não se pode esperar que as taxas de descarte no lixo comum ou dispositivos de hibernação em residências diminuam em breve. Este é um grande obstáculo no desenvolvimento de qualquer projeto dedicado a

extrair conteúdo valioso de tais materiais. Ainda, considerando a constante atualização tecnológica e curto prazo de renovação, com base em dispositivos quebrados ou funcionalidade obsoleta, pode-se esperar que o valor associado à hibernação continue a aumentar nos próximos anos, principalmente considerando a característica de uma ocorrência de material pouco explorada. Em mãos esta é uma fachada promissora do problema, pois o potencial econômico permanece inexplorado à espera de um projeto com uma forte estrutura de logística e comercialização de coleta para motivar a reciclagem de lixo eletrônico no Rio de Janeiro. Além disso, esse desafio deve permear de todas as comunidades educadas para outras camadas da sociedade, atingindo populações economicamente vulneráveis, que são tipicamente excluídas do acesso a informações e instalações de educação, para ampliar o potencial econômico da alternativa de reciclagem. Por outro lado, o cenário sinistro está no fato de que, com o aumento do estoque em hibernação, os riscos associados ao descarte inadequado aumentam drasticamente, principalmente no que diz respeito ao lixo urbano. Essa situação coloca em risco as regiões mais pobres da região metropolitana. É importante que políticas governamentais específicas associadas à informação sejam implementadas de forma efetiva, a fim de alterar essa perspectiva no futuro para fornecer condições suscetíveis a projetos de extração associados à reciclagem de lixo eletrônico no Rio de Janeiro.

6. Manuscrito 2

Conceptual Design, Cost Estimation and Sensitivity Analysis for Industrial Processing of Printed Circuit Boards in Brazil²

Resumo: Com uma geração de mais de 2 milhões de toneladas por ano, o Brasil é o maior produtor de lixo eletrônico na América Latina. Porém, o Brasil não possui tecnologia própria para tratamento de placas de circuito impresso, componente chave presente neste tipo de resíduo. Neste contexto, o processamento destes componentes permitiria a extração de metais com alto valor agregado, principalmente cobre, prata, ouro e paládio. O objetivo desta pesquisa é criar uma rota conceitual de tratamento, a partir da integração de tecnologias descritas na literatura. Após a criação do design da rota, foi realizado um balanço de massa e energia, considerando dois casos base de fonte de placas de circuito impresso como matéria prima matéria prima: A) Lixo eletrônico em geral; B) utilizando somente celulares. Para ambos os casos, foi considerado o tratamento de 2 t/h. Adicionalmente, foi realizada estimativa de custo e análise de sensibilidade da planta. Para 15 anos de produção da planta, o Capex calculado foi de USD 2,002,682, onde foi obtido uma taxa interna de retorno de 141,6% e 3990,7% para o caso A e B, respectivamente e valor presente líquido de USD 44,834,616 e USD 3,215,300,083 para o caso A e B, respectivamente. Adicionalmente, foi determinado que o caso A possui uma grande sensibilidade a variação da taxa de ocupação. Neste contexto, a presente pesquisa tem o potencial de ajudar na criação da primeira planta industrial brasileira voltada para a reciclagem de placas de circuito impresso, assim como entender quais são as variáveis chaves para o processamento destes componentes. Adicionalmente, o projeto apresenta o investimento necessário para a criação da planta, sendo uma informação crucial para potenciais investidores.

² O presente manuscrito até a data de certificação desta dissertação de mestrado estava submetido e em processo de revisão em um periódico internacional indexado.

6.1. Introdução

A quantidade de *Waste Electrical and Eletronical Equipament* (WEEE) gerada mundialmente tem crescimento anual de 3-5% [5,7,12] e com uma quantidade anual estimada em mais de 53 milhões de toneladas [4]. Neste contexto, o Brasil é o segundo maior gerador de WEEE das américas, com uma produção anual superior a 2 milhões de toneladas [4] e, menos de 10% de todo este waste é tratado de forma minimamente apropriada [9,10].

Neste contexto, surge a necessidade de lidar com o WEEE gerado no Brasil, o qual possui uma grande quantidade de recursos materiais que podem ser recuperados e reutilizados. Partindo desta necessidade, surgem conceitos e ideias voltadas para a gestão e tratamento destes resíduos, onde podem ser notadamente citados a economia circular e a mineração urbana [11,12]. Juntos, estes dois conceitos podem ser aplicados no tratamento do lixo eletrônico, onde a economia circular ganha visibilidade, incentivando a utilização de fontes secundárias de matéria prima para a produção de bens de consumo [12] e a mineração urbana visa a extração de materiais e componentes de resíduos urbanos [11].

Devido à grande variedade de componentes presentes no lixo eletrônico, está presente em sua composição uma grande gama de elementos [15], tornando-o assim uma potencial fonte de extração de materiais. Quando analisada a composição de metais presentes nesse tipo de sucata, ela possui 40 a 50 vezes maior concentração que quando comparado com depósitos naturais [14,99]. Neste contexto, pode-se dividir os elementos metálicos encontrados na sucata eletrônica em 5 grupos: O de metais preciosos, metais do grupo da platina (PGM), metais base, metais que apresentam risco ao meio ambiente e metais escassos [5,34]. Dentre todos os componentes presentes no WEEE, pode-se citar as placas de circuito impresso (PCB) como um dos componentes mais complexos e com maior potencial de ser fonte de materiais com alto valor agregado [9,17]. Anualmente, a fabricação mundial de PCB crescimento de 17-25% [18], onde em média ela representa cerca de 3 a 6% de toda massa presente no lixo eletrônico [19,20].

No contexto apresentado, o componente do WEEE com maior interesse econômico para ser reciclado são as PCB [68], uma vez que este componente possui maiores frações de ouro, prata, cobre e paládio [117]. A composição média presente em uma placa de circuito impresso, onde aproximadamente 40% da massa é composta de metais, 30% de cerâmicos e 30% de plásticos [64,69]. Porém, vale ressaltar que as composições podem variar drasticamente dependendo do tipo de equipamento [65], onde por

exemplo, placas de aparelhos celulares tendem a possuir uma fração mássica de metal acima de 60%, possuindo ainda maiores concentrações de ouro e prata quando comparada com outros equipamentos [66,111].

Celulares podem ter composições de até 347 g de Au , 3,63 kg de Ag por tonelada de device [65,111]. Adicionalmente, a concentração de Pd pode ser de até 100 mg/kg, tornando-as assim uma possível fonte secundária destes elementos [96,97]. Desta forma, torna-se interessante utilizar este tipo de device como fonte para extração de metais preciosos.

No contexto do Brasil, em 2018, existiam 134 centros de reciclagem de sucata e 13 centros de exportação no país, onde a maior concentração dessas empresas se dá na região sul e sudeste do país [21]. E praticamente todos os centros de reciclagem só realizam as primeiras etapas desse processo, as quais seriam a separação e desmanche dos equipamentos, não sendo realizadas as etapas posteriores de processamento e recuperação dos componentes presentes na sucata eletrônica. Sendo assim, componentes complexos com alto valor agregado e.g. PCB, são normalmente exportados para fora do Brasil, normalmente para o Canada, Bélgica e Singapura [9,22,23]. Adicionalmente, no Brasil existe um elevado número de celulares e outros equipamentos de pequeno tamanho que estão guardados, tendo o potencial de serem reciclados [10].

Um motivo para os componentes complexos serem exportados é o de que o Brasil não possui tecnologia nacional para o tratamento destes componentes, necessitando assim de incentivos para a realização de estudos visando a criação de tecnologias brasileiras para o tratamento e reciclagem dos mesmos [9,23]. Adicionalmente, na literatura os trabalhos científicos realizados na área de tratamento de WEEE são na maioria voltados para o management ou para pontos específicos deste tema [118].

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo propor uma rota conceitual brasileira para o tratamento de componentes complexos de WEEE (e.g. PCB), para tal finalidade foram analisados diversos trabalhos da literatura. Através de várias potenciais tecnologias revisadas na literatura, foi criada uma rota integrada para extrair-se materiais de alto valor agregado de PCB. Adicionalmente, foi criado diagramas de bloco da rota criada, foi realizado o balanço de massa e energia e balanço econômico da rota criada, para determinar a viabilidade do tratamento do WEEE no Brasil.

6.2. Metodologia

6.2.1.

Suposições do processo

Para criar-se a rota integrada para tratamento de PCB no Brasil, foi revisado na literatura as principais etapas necessárias para recuperação do e-waste. Neste contexto, as principais etapas para reciclagem são [15,17,23]:

- Desmontagem: Desmontagem do equipamento eletrônico, onde separa-se os componentes do equipamento.
- Tratamento físico-mecânico e separação: Redução do volume das PCB e separação dos materiais presentes nela (e.g. plásticos, metais ferrosos, metais não ferrosos, fibra de vidro, dentre outros).
- Recuperação do metal: recuperação dos metais de alto valor agregado (principalmente ouro, prata, platina e cobre). Nesta etapa, são aplicados principalmente processos pirometalurgicos ou hidrometalurgicos.

Dentro destas etapas principais identificadas, foram obtidos todos os inputs necessários para criação da rota conceitual e para geração de um balanço de massa e energia que permita estimar os custos do processo como um todo. Neste contexto, foram analisados dois casos base para reciclagem de PCB no Brazil: A) Utilização de qualquer tipo de e-waste; B) Utilização de celulares, uma vez que os mesmos possuem uma maior fração de PCB e uma maior fração de metais preciosos [10]. Os dados utilizados como *input* para o balanço de massa estão apresentados na Tabela 11. Para visualização da rota integrada, foram criados dois diagramas de bloco com os principais processos da rota. Para a criação dos diagramas foi utilizado o open software draw.io [119].

Tabela 11. Valores de frações obtidos na literatura para tratamento das PCB.

Fração	Valor para e-waste no geral (Caso A)	Referência	Valor para celulares (Caso B)	Referência
PCB no e-waste	0.045	[19]	0.25	[36,67]
Polímero decomposto na pirólise	0.238	[76]	0.13	[66]
Gases condensáveis na pirólise	0.76	[76]	0.76	[76]
Não magnética	0.9	[111,118]	0.9	[111,118]
Au	0.00025	[34,68,91]	0.000347	[65,111]
Ag	0.0003	[68]	0.00363	[65,111]
Cu	0.25	[120,121]	0.128	[65,111]
Pd	0.00014	[5]	0.00015	[65,111]
Fibra de vidro	0.3	[120]	0.24	[66]

Como já apresentado, o Brasil gera mais de 2 milhões de toneladas por ano [4], porém, apenas cerca de 2% é coletada (cerca de 40,000 tones) [23,122] contudo, a lei Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)[54], tem a meta de elevar esse valor para 17% (cerca de 340,000 tones) [55]. Neste contexto, foi proposto uma vazão de WEEE a ser tratado de 2 ton/h, o que representa 5% da meta anual proposta pela PNRS. Adicionalmente, no Brasil há mais de 16,96 milhões de telefones celulares em hibernação [10], tornando válida o estudo do Base Case B para reaproveitar os materiais presentes nestes celulares. Foi considerada uma taxa de recuperação de 100%.

6.2.2.

Análise econômica

Para a análise econômica da rota, foi estimado o Capex e Opex de uma planta utilizando a rota conceitual criada. Para a instalação da planta, o Capex foi calculado para o processo principal, considerando equipamentos principais e auxiliares, onde estimou-se o valor total pelo método padrão descrito no livro *Plant Design and Economics for Chemical by Peter & Timmerhaus 1991* [123,124]. O Opex foi estimado considerando custos fixos (e.g.), custos variáveis (e.g.) e custos com pessoal. Foi considerado uma operação contínua de 24 horas/dia e 30 dias/mês.

Os custos dos equipamentos principais foram estimados por cotações nos sites de fornecedores internacionais, onde foi considerado o preço médio dos equipamentos. Uma vez que as cotações foram obtidas a valores atuais, não foi necessário aplicar nenhum método de valor presente para corrigir os custos. Além disso, os preços cotados

foram ajustados para incluir impostos de importação e frete. Para o cálculo da receita da planta, foi apenas considerado o valor do Au, Ag, Cu e Pd obtidos, onde o preço de venda para cada metal foi de 57590 USD/kg para Au, 819,88 USD/kg para Ag, 9,75 USD/kg para Cu e 84488 USD/kg para Pd. Todos os preços considerados foram retirados da cotação do mercado para o final do mês de julho de 2021 [125]. Para ser conservador, foram considerados 90% do preço de venda dos metais cotados, por se tratarem de commodities, os valores desses metais podem ter variações significativas [126,127].

Adicionalmente, foi considerado imposto de 18% para venda dos metais [122], o imposto de renda de 25% sobre o lucro bruto, foi fixada um valor de depreciação ao ano de 10% do Capex calculado [128], um fundo de manutenção de 3% do Capex e uma correção anual devida à inflação de 7% (como uma aproximação da inflação brasileira [129]). Foi considerada em toda a análise de viabilidade econômica o uso de 100% de capital próprio, sem considerar financiamento de terceiros. Então, foi gerado o demonstrativo de resultados do exercício e o fluxo de caixa livre. Adicionalmente, foi realizada uma análise de sensibilidade das principais variáveis do projeto, para determinar a influência delas no valor presente líquido (VPL) das principais variáveis foi determinado. Finalmente, foi determinada a taxa interna de retorno (TIR), considerando a taxa mínima de atratividade (TMA) para a viabilidade da planta em 12%, já que é usual considerar a TMA nesta faixa para investimentos industriais no Brasil [130,131].

6.3. Resultados

6.3.1. Descrição do processo

A rota conceitual proposta está apresentada na Figura 8, ela se inicia pela separação dos componentes do WEEE. No processo proposto o único componente desejado são as PCB. Uma vez que a prática de coleta e separação de WEEE já está presente no Brasil [22], existe a possibilidade de o PCB ser recolhido de centros de coleta, não necessitando necessariamente desta primeira etapa. Com a finalidade de reduzir o tamanho e liberar elementos presentes nas PCB, elas devem ser trituradas [15], processos parecidos requerem por volta de 137 MJ por tonelada de material a ser triturado [111].

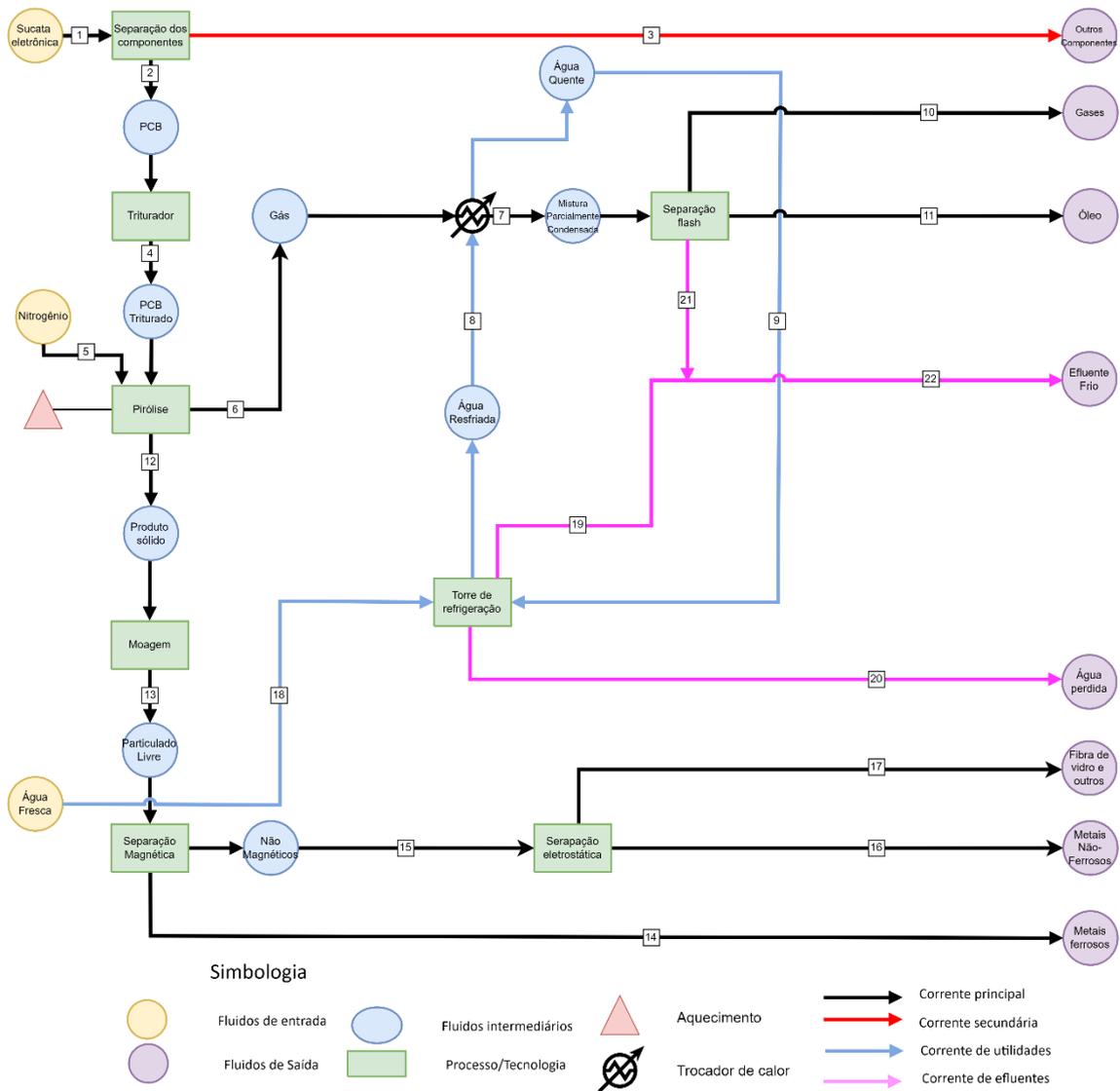


Figura 8. Diagrama de blocos da primeira parte da rota proposta.

Os PCB triturados são então encaminhados para um pirolisador com atmosfera inerte de nitrogênio, onde as frações metálicas e a não metálica inorgânica serão concentradas [67,68], enquanto a fração orgânica será volatilizada e os gases condensáveis serão recuperados como óleo. Para otimização do processo, deve ser aplicada pirólise a baixa temperatura, a qual permite uma melhor separação dos metais e da fibra de vidro, quando comparado com altas temperaturas [77,132,133]. O óleo obtido nesta fase tem o potencial de ser utilizado como combustível no processo [77,132,134], ou ser empregado como fonte de fenóis ou matéria prima para produção de resinas [76]. A energia necessária para a reação endotérmica de pirólise do PCB é de 19692 MJ por tonelada de PCB [132].

O produto sólido da pirólise é então moído em um moinho de bolas, onde a meta é reduzir os sólidos de forma a liberar as partes metálicas das não metálicas [135,136].

Devido a heterogeneidade do PCB, o mesmo não tem um tamanho liberado específico, onde a parte não metálica tende a se concentrar em fração mais finas [136]. Utilizando um moinho com potência de 90 kW, o consumo desta operação será de 324 MJ por hora.

O produto liberado é então submetido a separação magnética e eletrostática [17,136,137]. A separação magnética é aplicada primeiro, separando componentes metálicos, i.e., principalmente Fe and Ni dos demais [137]. Para a separação magnética foi considerado o consumo descrito na literatura para mineração, o qual é de 504 MJ por hora de operação [138]. Adicionalmente, a separação eletrostática tem o potencial de separar metais não ferrosos de outros compostos inorgânicos, onde considerando um separador com consumo de 5 kW, o consumo desta operação será de 18 MJ por hora.

Os produtos metálicos obtidos na separação eletrostática são submetidos a processos hidrometalúrgicos, como apresentado na Figura 9, para obtenção de metais com alto valor agregado. O principal objetivo é a recuperação de Cu, Ag, Au e Pd, onde os metais preciosos podem ser considerados como os principais elementos de valor agregado a serem recuperados, representando aproximadamente 60% [65] a 80% [111,139] de toda a PCB.

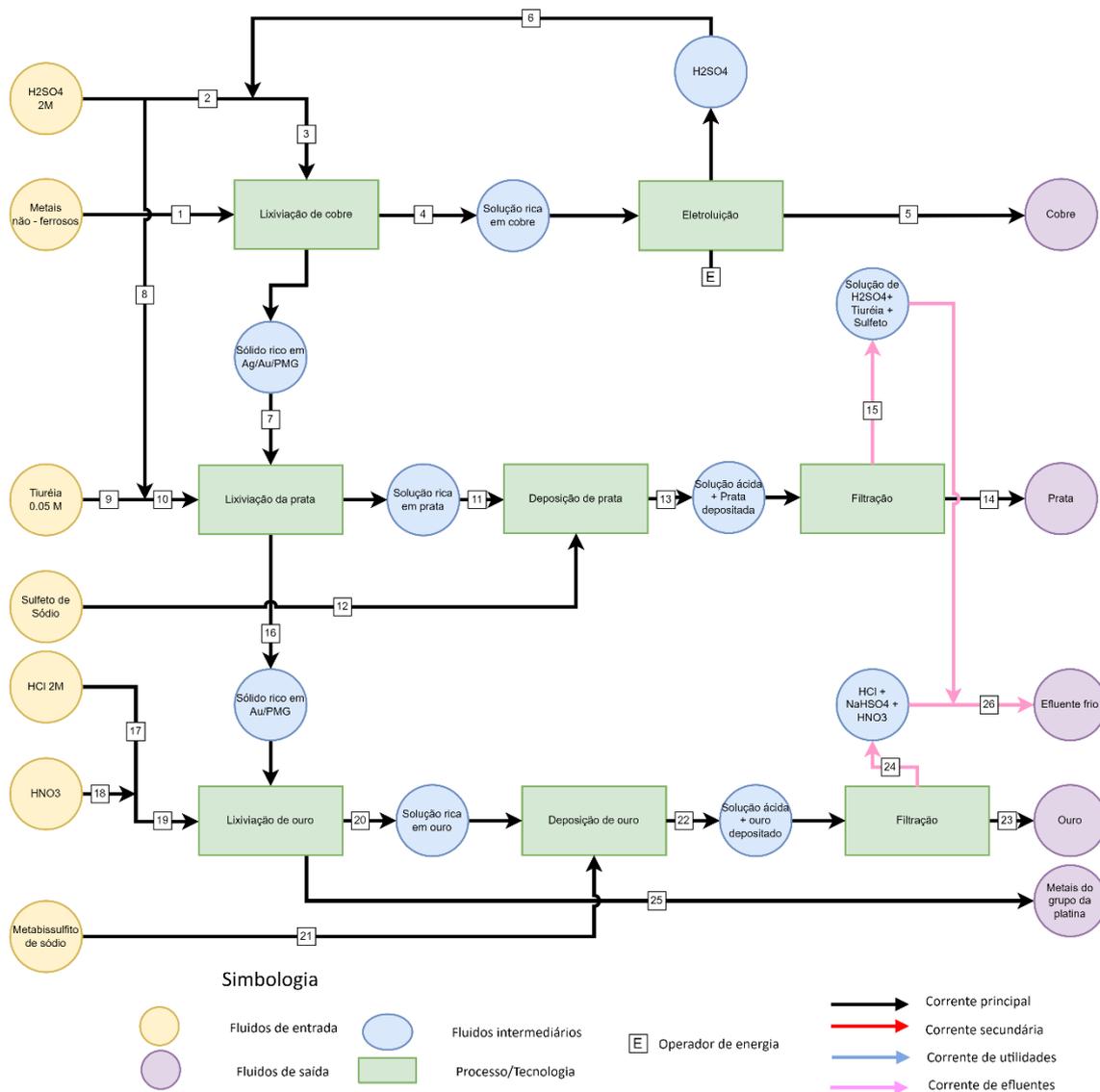


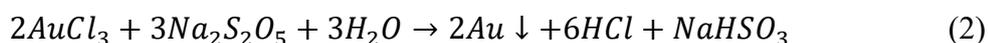
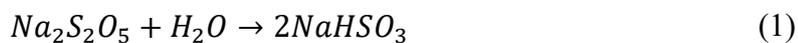
Figura 9. Diagrama de blocos da segunda parte da rota proposta.

Neste contexto, a corrente de metais não ferrosos é primeiramente tratada com uma solução 2 M de H_2SO_4 , onde o cobre é lixiviado em sulfato de cobre ($CuSO_4$) [29,111]. Para evitar potenciais empecilhos causados pela corrosão devida ao H_2SO_4 , é descrito na literatura outros processos de lixiviação de cobre, como a utilização de íons de Fe^{3+} [20,121,139], ou a complexação do cobre por processos de quelação-desquelação[140], porém futuros estudos são necessários. O cobre é então recuperado por eletrolução, onde é utilizada uma voltagem de 3 V com o gasto energético próximos de 10000 MJ por tonelada de cobre recuperada [111,141].

O resíduo de lixiviação é altamente rico em Ag, Au e Pd [111,142], sendo assim, três etapas são realizadas: extração de prata, ouro, e refino do paládio. Neste contexto, para a extração de prata, foi escolhido utilizar a solução de 0.05 M H_2SO_4 e 0.05 M thiureia, a qual tem potencial de extrair mais de 99% da prata presente [36,143]. Esta solução

lixivante forma um complexo com a prata ($[Ag(CS(NH_2)_2)]^{3+}$), que a prata pura é recuperada via precipitação utilizando 50 mM de solução de sulfeto de sódio ($Na_2S \cdot 9H_2O$), onde pode ser recuperado até 100% da prata [36,143].

O sólido não lixiviado é então levado para outra etapa, onde o ouro é extraído através da adição de uma solução de 2 M HCl e HNO_3 numa razão de 3:1 [29]. Após, é adicionado na solução lixiviada metabisulfito de sódio, o qual promove a precipitação do ouro [29], conforme apresentado na equação 1 e 2. Devido as características corrosivas deste método, é também possível aplicar outras soluções e.g. tiuréia em meio alcalino [70]. O sólido restante, que não foi lixiviado, consiste de elementos do grupo da platina, principalmente paládio, o qual pode ser obtido através de processo de deposição fracionada, no qual há um consumo energético de 64120 MJ por kg de produto produzido [111].



6.3.2.

Balanco de massa e energia

Como já colocado, para os dois casos base, foi fixada uma entrada de WEEE de 2 ton/h. Desta forma, para obter-se o balanço de massa, foram utilizadas as informações apresentadas na Tabela 11. Analisando a primeira parte do processo (Figura 8), as correntes de entrada e saída estão apresentadas na Tabela 12, adicionalmente, na Tabela 13 estão apresentadas as entradas e saídas da segunda parte do processo (Figura 9).

Tabela 12. Vazões e composições das correntes de entrada e de saída da primeira parte do processo.

Fluido de Entrada	Vazão (kg/h) – Caso A	Vazão (kg/h) – Caso B
WEEE	2000	2000
Água	18.51	56.16
Nitrogênio	(apenas utilizado para inertização inicial, não contabilizado)	(apenas utilizado para inertização inicial, não contabilizado)
Fluido de Saída	Vazão (kg/h) – Base Case A	Vazão (kg/h) – Base Case B
Outros componentes	1910	1500
Gases não condensáveis	5.1	15.6
Óleo	16.3	49.4
Água Perdida	18.5	56.16
Fibra de vidro e outros	39.2	127.3
Metais não ferrosos	22.6	264.3
Metais ferrosos	6.9	43.5

Tabela 13. Vazões e composições das correntes de entrada e de saída da segunda parte do processo.

Fluido de Entrada	Vazão (kg/h) – Caso A	Vazão (kg/h) – Caso B
H ₂ SO ₄	0,13	33,85
Metais não ferrosos	22,6	264,3
Tiuréia	0,13	33,85
Sulfeto de sódio	0,1	3,75
HCl	0,0675	2,082
HNO ₃	0,02	0,69
Metabissulfito de sódio	0,17	5,28
Fluido de Saída	Vazão (kg/h) – Caso A	Vazão (kg/h) – Caso B
Cu	22,5	256
Ag	0,27	7,26
Au	0,0225	0,694
Pd	0,0126	0,30

Subsequentemente, considerando o processo inteiro, para o caso base A, é possível obter 22,5 g/h de Au, 27,0 g/h de Ag, 22,5 Kg/h de Cu e 12,6 g/h de Pd. Quando analisado o processo para o caso B, é possível obter 694 g/h de Au, 7,26 kg/h de Ag/h, 256 kg/h de Cu e 300 g/h de Pd.

O consumo de energia para o base case A requerido no processo está apresentado na Tabela 14, o consumo calculado é de 3438,5 MJ/h. Adicionalmente, como pode ser observado na Tabela 15, a energia total gasta no base case B é de 29996,5 MJ/h.

Tabela 14. Consumo de energia para processar o PCB para o Base Case A

Processo	Consumo de energia [MJ/h]	Referência
Trituração	12,33	[111]
Pirólise	1772,28	[132]
Moagem	324	[144]
Separação magnética	504	[138]
Separação eletrostática	18	[145]
Eletroluição	225	[141]
Recuperação de paládio	807,91	[111]
Total	3663,52	

Tabela 15. Consumo de energia para processar o PCB do Base Case B

Processo	Consumo de energia [MJ/h]	Referência
Trituração	68,5	[111]
Pirólise	9846	[132]
Moagem	324	[144]
Separação magnética	504	[138]
Separação eletrostática	18	[145]
Eletroluição	2560	[141]
Recuperação de paládio	19236	[111]
Total	32556,5	

6.3.3.

Estimativa de custos

Os custos dos equipamentos principais para a rota criada estão apresentados na Tabela 16, adicionalmente, foi considerado um valor de 10% do valor principal para equipamentos auxiliares. O preço total estimado para equipamentos foi de USD 456,192.00.

Tabela 16. Custos de equipamento de processo principal para o caso base

Equipamentos	Quantidade	Custo total [USD]	Referência
1 Triturador	1	56,700	[146]
2 Pirolizador	1	108,000	[147]
3 Moinho de bolas	1	56,700	[148]
4 Filtro prensa	2	58,320	[149]
5 Separador eletrostático	1	40,500	[150]
6 Separador magnético	1	13,500	[151]
7 Células de eletroluição	3	81,000	[152]
Total		414,720	
Total equipamentos principais + auxiliares		456,192.00	

Com o valor total estimado para equipamentos, o mesmo foi utilizado como 100% do valor para aplicação do método de Peter & Timmerhaus [123,124]. Neste contexto, foi obtido um capital total fixo de investimento de USD 2,002,682, como mostrado na Tabela 17. Para os dois casos, o preço de compra de WEEE foi fixado em 455,82 USD/ton (Considerando valor atualizado obtido pelo estudo de Azevedo, 2019 [122]), o custo de energia foi de 105.00 USD/MWh, os custos de reagente variaram em uma faixa de 7.00-12,00 USD/kg e o custo da água foi fixado em 2.00 USD/ton. O custo anual com pessoal foi estimado em USD 781,056. Neste contexto, para o processamento de 2 ton/h de WEEE, o custo anual de operação está descrito na

Tabela 18, é de USD \$9,911,396.30 e USD 34,812,708.06 para o Caso A e o B, respectivamente. O capital de giro foi considerado como sendo os custos operacionais para 2 meses de operação, o que equivale a USD 1,666,793 e USD 6,156,740 para o Caso A e o B, respectivamente. Então, o total de investimento para os Casos A e B foram USD 3,669,476 e USD 8,159,423.

Tabela 17. Capex total para os casos A e B.

Custos Diretos			
A	Equipamento principal	100%	456,192.00
1	Instalação de equipamento adquirido	38%	173,352.96
2	Instrumentação e controles (instalados)	13%	59,304.96
3	Tubulação (instalada)	29%	132,295.68
4	Instalação Elétrica (instalado)	18%	82,114.56
5	Edifícios (incluindo serviços)	35%	159,667.20
6	Preparação do terreno	10%	45,619.20
7	Serviços gerais	56%	255,467.52
8	Terreno	5%	22,809.60
B	Custos indiretos		
9	Engenharia e supervisão	40%	182,476.80
10	Despesas de construção	45%	205,286.40
11	Taxa do empreiteiro	9%	41,057.28
12	Contingências	41%	187,038.72
Total (A+B)			2,002,682.88

Tabela 18. Despesas anuais do processo para os casos A e B.

Item	Base Case A	Base Case B	
Despesas variáveis			
1	Lixo eletrônico	7,876,569.60	
2	Água	319.80	970.44
3	H2SO4	21,755.03	5,849,684.85
4	Tiuréia	13,053.02	3,509,810.91
5	Sulfeto de sódio	1,204.39	323,847.44
6	HCL	5,248.80	161,896.32
7	HNO3	1,360.80	41,973.12
8	Metabissulfito de sódio	14,802.03	456,560.41
9	Energia	866,507.54	7,559,117.98
C	Total	8,800,821.00	25,780,431.07
Despesas Fixas			
10	Telefone/ Serviço de internet	4,800.00	4,800.00
11	P&D ^a	303,470.23	8,603,532.12
12	Despesas Gerais	24,000.00	24,000.00
13	Serviço de Manutenção	12,000.00	12,000.00
14	Serviço de Contabilidade	4,800.00	4,800.00
	Contingencias	54,919.88	1,375,203.50
D	Total	418,884.27	10,378,958.55
Despesas com mão de obra ^b			
	Cargo	Quantidade	Valor
15	Gestor da Planta	1	51,840.00
16	Engenheiro	4	167,616.00
17	Operador	10	172,800.00
18	Assistentes	15	162,000.00
19	Administrativo	5	86,400.00
20	Serviços gerais	5	32,400.00
21	Segurança	10	108,000.00

E	Total	781,056.00
Total (C+D+E)		10,000,761
		36,940,455

- Custo com P&D considerando 1,5% da receita bruta.
- Considerando os impostos previstos na lei brasileira.

6.4. Discussão

6.4.1.

Avaliação econômica

Tanto para o Case Base A quanto para o B, foi considerado um cenário de 15 anos de operação da planta, a DRE já com desconto de 25% do imposto de renda brasileiro pode ser observado nas Figura 10 e Figura 11. Para o cálculo do income DRE foram consideradas as rendas provenientes dos valores de venda dos metais, deste valor foi subtraído o valor de impostos, Opex, depreciação e fundo de manutenção.

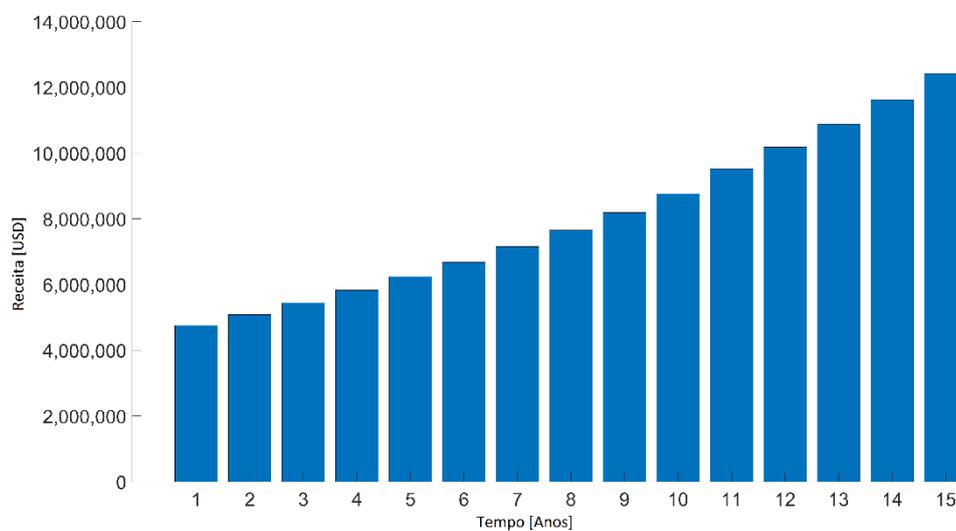


Figura 10. DRE para o caso A.

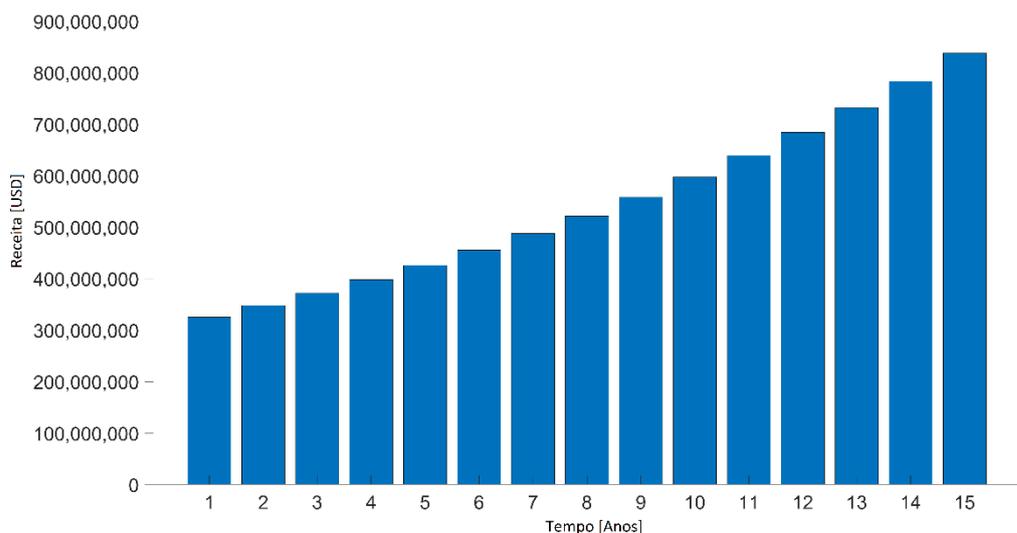


Figura 11. DRE para o Caso B

Adicionalmente, o Fluxo de Caixa Livre acumulado para os dois casos está apresentado na Figura 12 e Figura 13. Neste contexto, pode ser observado que para o caso A, o período de *payback* descontado foi de menos de um ano de operação, dando um VPL de USD 44,834,616 e uma TIR calculada de 141.6%. Como a TIR foi positiva, caso A pode ser considerado viável. Para o caso B, nas condições de operação consideradas, possui um período de *payback* descontado de menos de um ano, fato que está ligado pela grande fração de PCB nos celulares [36] e pelas grandes concentrações de Au, Ag e Pd [10,111]. Neste caso, o VPL foi de USD 3,215,300,083. Uma vez que estudos prévios já demonstraram que apenas para comunidade de ensino superior do Brasil a quantidade de metais que podem ser recuperados de telefones celulares e outros pequenos equipamentos eletrônicos no valor de quase USD 800.000[10], o VPL calculado não está fora do esperado. A TIR foi estimada em 3990.7%, fato que torna este caso muito viável.

Vale ressaltar que na rota proposta, não foi considerado o valor de venda do óleo produzido pela pirólise, dos metais ferrosos e da fibra de vidro, portanto, o lucro calculado neste trabalho está subestimado, podendo ter um acréscimo, caso os outros produtos fossem considerados. Porém, o valor dos metais preciosos pode chegar a mais de 90% do valor total presente no WEEE [10].

Desta forma, percebe-se que os dois casos base são viáveis, tornando-se interessante a aplicação da tecnologia nacional para reciclagem de PCB em território Brasileiro. O maior empecilho para a operação da planta seria a logística e a falta de políticas públicas voltadas para o descarte de lixo eletrônico no Brasil [10,101].

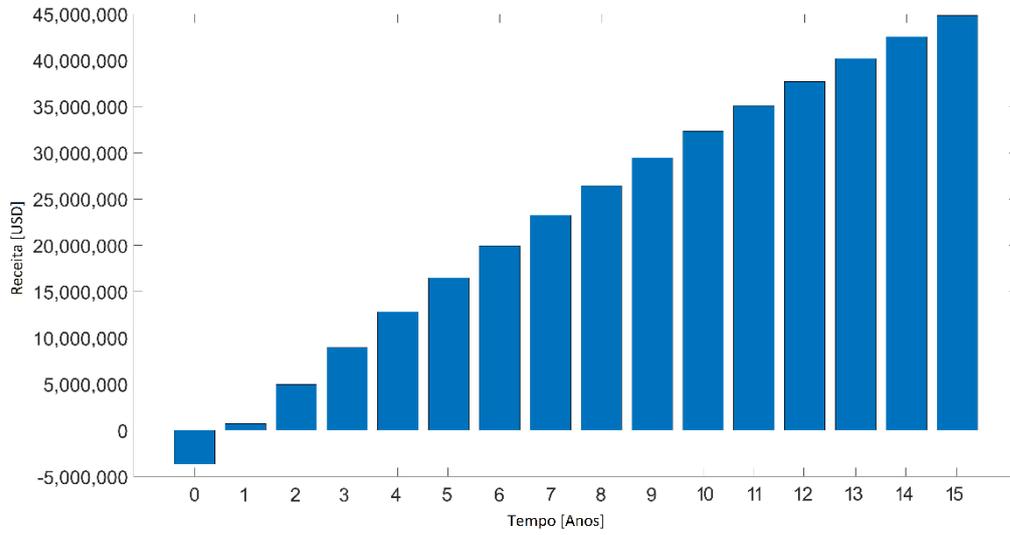


Figura 12. Fluxo de Caixa Livre acumulado para o caso A.

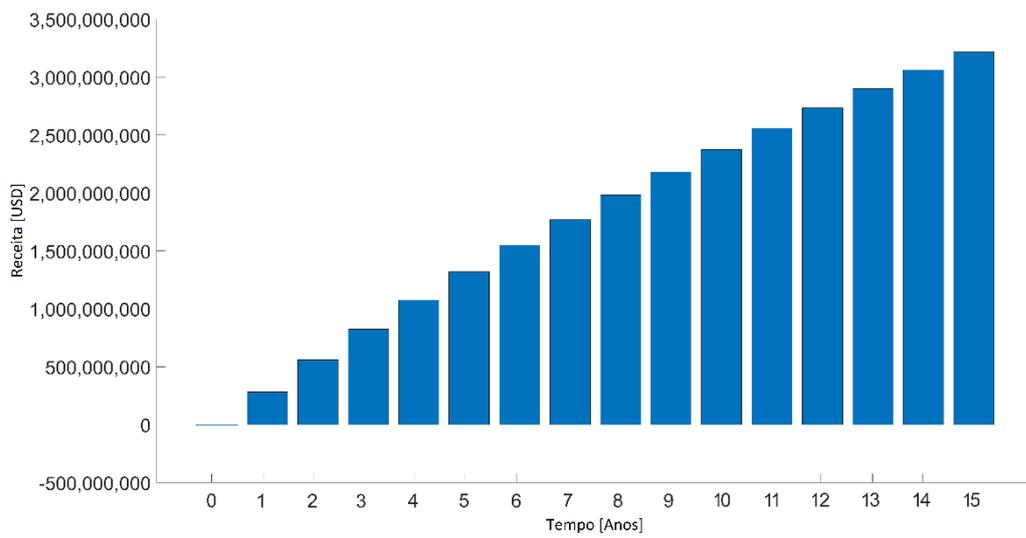


Figura 13. Fluxo de Caixa Livre acumulado para o caso B.

6.4.2.

Análise de sensibilidade

Para analisar a sensibilidade processo, foram selecionadas algumas variáveis presentes na análise econômica realizada, de forma a encontrar, caso a caso, os seus valores que zeram o VPL, mantendo as demais variáveis constantes. Neste contexto, as variáveis selecionadas foram: a) taxa de ocupação, b) número de meses de operação considerados no capital de giro, c) preço da sucata eletrônica, d) Capex, e) imposto de venda e f) preço de venda dos metais. Como pode ser observado na Figura 14, para o Base Case A, o processo é altamente sensível a variações taxa de processamento e tem um certo grau de sensibilidade à variação do preço do ouro, preço de compra de WEEE e preço do paládio. A variação do valor do Capex, do imposto sobre vendas e do valor do capital de giro não são tão sensíveis para zerar o VPL e, portanto, não são variáveis que influenciam a viabilidade da operação para um cenário de 15 anos. O preço da prata e do cobre não foram considerados, pois essas variáveis por si só não zeram o VPL.

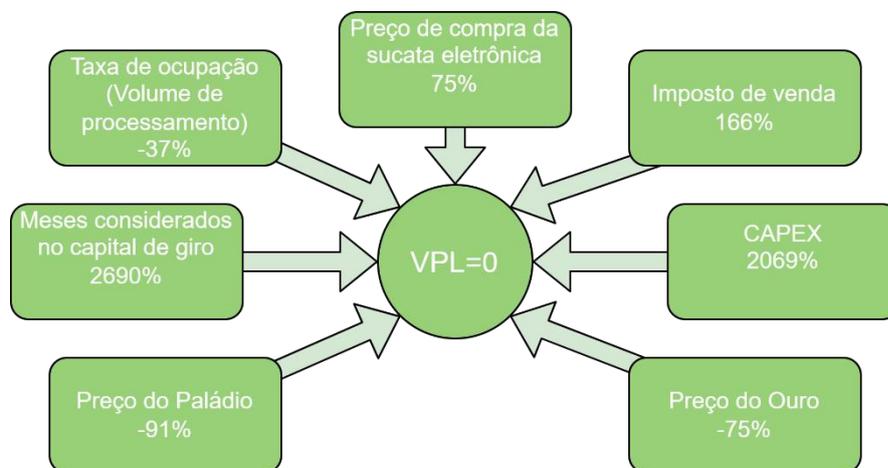


Figura 14. Análise de sensibilidade para zerar o VPL para o caso A.

Na Figura 15 está apresentada a análise de sensibilidade para o Caso B. Como pode ser observado, nenhuma variação pequena de uma variável torna o processo inviável. Inclusive, seria necessário um aumento de 5,367% no preço de compra do WEEE para tornar o processo inviável, dando assim uma grande folga na estimativa de preço de WEEE considerado. Adicionalmente, a variação do preço isolado dos metais não é capaz de zerar o VPL. Desta forma, pode-se observar que o Base Case B é altamente

lucrativo e com as variáveis consideradas, a possibilidade da planta se tornar inviável é muito baixa.

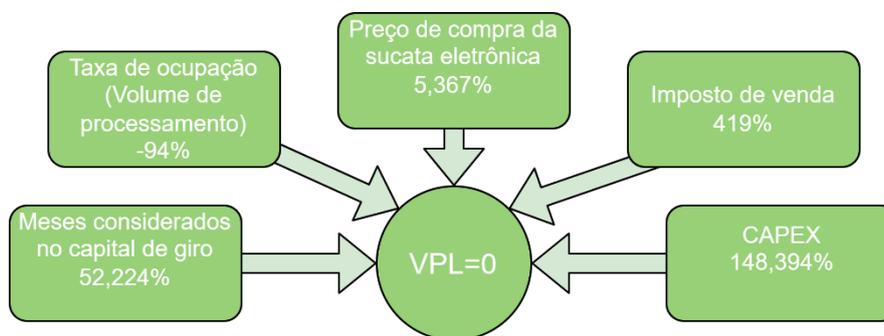


Figura 15. Análise de sensibilidade para zerar o VPL para o caso B.

6.5.

Conclusão

A presente pesquisa propôs uma rota integrada com potencial de tornar o Brasil um país com capacidade de processar PCB. Dada a análise econômica realizada, nos moldes propostos, o processo é viável tanto para o Base Case A, quanto para o B. Em 15 anos de operação, é possível obter-se um VPL maior que USD 44,8 milhões e USD 3,2 bilhões para o caso A e B, respectivamente. Adicionalmente, o total de investimento estimado para dos dois casos é de USD 3,6 milhões e USD 9,7 milhões, considerando Capex e capital de giro. O Opex para o Base Case A foi estimado em cerca de USD 10.0 milhões ao ano, enquanto que para o Base case B em USD 36,9 milhões. Dada a análise de sensibilidade, percebe-se que para o Base Case A, as variáveis referentes ao preço de venda do ouro, preço de compra do WEEE e a taxa de ocupação possuem alto grau de sensibilidade, podendo afetar a viabilidade. A TIR de ambos os casos foi maior que zero, fato que demonstra a viabilidade e a possível atração de investidores para o negócio.

Toda a análise realizada na pesquisa não levou em consideração os preços de venda de outros metais e produtos do processo, e.g. Ferro, Níquel, Óleo da pirólise. Neste contexto, as estimativas realizadas estão abaixo do valor real que pode ser obtido no processo, utilizando as variáveis consideradas. Porém, os metais considerados na análise representam mais de 90% do valor presente nas placas. Adicionalmente, em trabalhos futuros, é necessário considerar a logística de transporte do WEEE dos pontos de reciclagem até a planta, assim como determinar melhores pontos de coleta próprios, a fim de reduzir o valor de aquisição do WEEE.

7.

Considerações Finais

Através dos resultados da pesquisa realizada, percebe-se que no Brasil há uma grande quantidade de equipamentos eletrônicos de pequeno porte em hibernação, com alta concentração de metais preciosos. Neste contexto, a recuperação destes metais, poderia gerar mais de 2 bilhões de dólares no Brasil. É válido de nota que a pesquisa só avaliou alunos, funcionários e familiares de indivíduos pertencentes a instituições de ensino superior. Desta forma, o valor total que pode ser recuperado pode ser consideravelmente maior.

Adicionalmente, através da criação da rota integrada para recuperação de placas de circuito impresso, foi determinado que para um período de 15 anos, é possível obter-se um VPL de 44,8 milhões e USD 3,2 bilhões, considerando o tratamento de lixo eletrônico em geral e somente celulares, respectivamente. Adicionalmente, foi estimado um custo de Capex em 3,6 milhões e USD 9,7 milhões, para os dois casos considerados para o tratamento de PCB, a uma vazão de lixo eletrônico de 2 t/h.

Foi concluído, que para a rota criada, considerando-se as condições de operação propostas, o processo é viável economicamente, tendo uma TIR positiva em ambos os casos analisados. Desta forma, torna-se possível a instalação de uma planta para reciclagem de PCB no Brasil, fato que traria vantagens econômicas e ambientais para o país.

8.

Sugestões para Trabalhos Futuros

Tendo em vista os resultados obtidos neste trabalho, é possível sugerir trabalhos futuros, os quais irão dar continuidade ao tema. Neste contexto, os seguintes trabalhos são propostos:

- Recriar em laboratório toda a rota conceitual criada, de forma a comprovar que todos os dados da literatura integrados permitem a recuperação dos metais chaves presentes nas placas.
- Comparar experimentalmente a composição das placas de lixo eletrônico no geral com placas provenientes de smartphones. Sob essa perspectiva, é possível comprovar que a rota somente utilizando smartphones é realmente mais lucrativa.
- Considerar a utilização de outros reagentes para as fases de purificação de metais. Neste contexto, a utilização de métodos químicos menos corrosivos para a lixiviação dos metais seria extremamente benéfica para a rota criada, uma vez que a forte corrosão causada pelos métodos propostos pode acarretar danos prematuros a equipamentos.
- Avaliar processos de otimização para as tecnologias propostas neste trabalho, tais como estudos voltados para as condições da pirólise e para as etapas de separação propostas.

9.

Referências

1. Cocchiara, C.; Dorneanu, S.A.; Inguanta, R.; Sunseri, C.; Ilea, P. Dismantling and Electrochemical Copper Recovery from Waste Printed Circuit Boards in H₂SO₄–CuSO₄–NaCl Solutions. *Journal of Cleaner Production* 2019, 230, 170–179, doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.112.
2. Ruan Barbosa de Aquino, Í.; Ferreira da Silva Junior, J.; Guarnieri, P.; Camara e Silva, L. The Proposition of a Mathematical Model for the Location of Electrical and Electronic Waste Collection Points. *Sustainability (Switzerland)* 2021, 13, 1–15, doi:10.3390/su13010224.
3. Aidonis, D.; Achillas, C.; Folinis, D.; Keramydas, C.; Tsolakis, N. Decision Support Model for Evaluating Alternative Waste Electrical and Electronic Equipment Management Schemes-A Case Study. *Sustainability (Switzerland)* 2019, 11, 1–13, doi:10.3390/su10023364.
4. Adrian, C.S.; Drisse, M.B.; Cheng, Y.; Devia, L.; Deubzer, O. *The Global E-Waste Monitor 2020*; UNU- United Nations University, 2020; ISBN 9789280891140.
5. Tesfaye, F.; Lindberg, D.; Hamuyuni, J.; Taskinen, P.; Hupa, L. Improving Urban Mining Practices for Optimal Recovery of Resources from E-Waste. *Minerals Engineering* 2017, 111, 209–221, doi:10.1016/j.mineng.2017.06.018.
6. Zhang, L.; Xu, Z. A Review of Current Progress of Recycling Technologies for Metals from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Cleaner Production* 2016, 127, 19–36, doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.004.
7. Shevchenko, T.; Laitala, K.; Danko, Y. Understanding Consumer E-Waste Recycling Behavior: Introducing a New Economic Incentive to Increase the Collection Rates. *Sustainability (Switzerland)* 2019, 11, doi:10.3390/su11092656.
8. Parajuly, K.; Fitzpatrick, C. Understanding the Impacts of Transboundary Waste Shipment Policies: The Case of Plastic and Electronic Waste. *Sustainability (Switzerland)* 2020, 12, doi:10.3390/su12062412.
9. de Albuquerque, C.A.; Mello, C.H.P.; Gomes, J.H. de F.; Santos, V.C. dos; Zara, J.V. E-Waste in the World Today: An Overview of Problems and a Proposal for Improvement in Brazil. *Environmental Quality Management* 2020, 29, 63–72, doi:10.1002/tqem.21682.

10. D’Almeida, F.S.; de Carvalho, R.B.; dos Santos, F.S.; de Souza, R.F.M. On the Hibernating Electronic Waste in Rio de Janeiro Higher Education Community: An Assessment of Population Behavior Analysis and Economic Potential. *Sustainability* 2021, 13, 9181, doi:10.3390/su13169181.
11. Cossu, R.; Williams, I.D. Urban Mining: Concepts, Terminology, Challenges. *Waste Management* 2015, 45, 1–3, doi:10.1016/j.wasman.2015.09.040.
12. Ottoni, M.; Dias, P.; Helena, L. A Circular Approach to the E-Waste Valorization through Urban Mining in Rio de Janeiro , Brazil. *Journal of Cleaner Production* 2020, 261, 120990, doi:10.1016/j.jclepro.2020.120990.
13. Xavier, L.H.; Giese, E.C.; Ribeiro-Duthie, A.C.; Lins, F.A.F. Sustainability and the Circular Economy: A Theoretical Approach Focused on e-Waste Urban Mining. *Resources Policy* 2019, 101467, doi:10.1016/j.resourpol.2019.101467.
14. Thakur, P.; Kumar, S. Metallurgical Processes Unveil the Unexplored “Sleeping Mines” e- Waste: A Review. *Environmental Science and Pollution Research* 2020, doi:10.1007/s11356-020-09405-9.
15. Vermeşan, H.; Tiuc, A.E.; Purcar, M. Advanced Recovery Techniques for Waste Materials from IT and Telecommunication Equipment Printed Circuit Boards. *Sustainability (Switzerland)* 2020, 12, 1–23, doi:10.3390/SU12010074.
16. Andersen, T.; Jæger, B.; Mishra, A. Circularity in Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive. Comparison of a Manufacturer’s Danish and Norwegian Operations. *Sustainability (Switzerland)* 2020, 12, doi:10.3390/su12135236.
17. Rocchetti, L.; Amato, A.; Beolchini, F. Printed Circuit Board Recycling: A Patent Review. *Journal of Cleaner Production* 2018, 178, 814–832, doi:10.1016/j.jclepro.2018.01.076.
18. Zhang, D. jun; Dong, L.; Li, Y. tong; Wu, Y.; Ma, Y. xia; Yang, B. Copper Leaching from Waste Printed Circuit Boards Using Typical Acidic Ionic Liquids Recovery of E-Wastes’ Surplus Value. *Waste Management* 2018, 78, 191–197, doi:10.1016/j.wasman.2018.05.036.
19. Arshadi, M.; Yaghmaei, S.; Mousavi, S.M. Content Evaluation of Different Waste PCBs to Enhance Basic Metals Recycling. *Resources, Conservation and Recycling* 2018, 139, 298–306, doi:10.1016/j.resconrec.2018.08.013.
20. Becci, A.; Amato, A.; Rodríguez-Maroto, J.M.; Beolchini, F. Bioleaching of End-of-Life Printed Circuit Boards: Mathematical Modeling and Kinetic Analysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2021, 60, 4261–4268, doi:10.1021/acs.iecr.0c05566.

21. 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* 2018, 174, 7–16, doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.219.
22. 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* 2018, 174, 7–16, doi:10.1016/j.jclepro.2017.10.219.
23. Azevedo, L.P.; da Silva Araújo, F.G.; Lagarinhos, C.A.F.; Tenório, J.A.S.; Espinosa, D.C.R. E-Waste Management and Sustainability: A Case Study in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research* 2017, 24, 25221–25232, doi:10.1007/s11356-017-0099-7.
24. Ibanescu, D.; Cailean (Gavrilescu), D.; Teodosiu, C.; Fiore, S. Assessment of the Waste Electrical and Electronic Equipment Management Systems Profile and Sustainability in Developed and Developing European Union Countries. *Waste Management* 2018, 73, 39–53, doi:10.1016/j.wasman.2017.12.022.
25. Duygan, M.; Meylan, G. Resources , Conservation and Recycling Strategic Management of WEEE in Switzerland — Combining Material Flow Analysis with Structural Analysis. “Resources, Conservation & Recycling” 2015, 103, 98–109, doi:10.1016/j.resconrec.2015.06.005.
26. Cucchiella, F.; Adamo, I.D.; Koh, S.C.L.; Rosa, P. Recycling of WEEEs : An Economic Assessment of Present and Future e-Waste Streams. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2015, 51, 263–272, doi:10.1016/j.rser.2015.06.010.
27. Menikpura, S.N.M.; Hotta, Y.; Santo, A.; Jain, A. Socio-Economic and Environmental Attributes of Waste Electrical and Electronic Equipment (Weee) Recycling in Asia. *MATTER: International Journal of Science and Technology* 2017, 2, 183–199, doi:10.20319/mijst.2016.23.183199.
28. Buttel, F.H. Environmenatl Sociology and the Explanation of Environmental Reform. *Organization and Environment* 2003, 16, 306–344, doi:10.1177/1086026603256279.
29. Barnwal, A.; Dhawan, N. Recycling of Discarded Mobile Printed Circuit Boards for Extraction of Gold and Copper. *Sustainable Materials and Technologies* 2020, 25, e00164, doi:10.1016/j.susmat.2020.e00164.

30. Zhang, L.; Xu, Z. A Review of Current Progress of Recycling Technologies for Metals from Waste Electrical and Electronic Equipment. *Journal of Cleaner Production* 2016, 127, 19–36, doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.004.
31. 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, 24, 6989–7008, doi:10.1007/s11356-016-8313-6.
32. Parajuly, K.; Habib, K.; Cimpan, C.; Liu, G.; Wenzel, H. End-of-Life Resource Recovery from Emerging Electronic Products – A Case Study of Robotic Vacuum Cleaners. *Journal of Cleaner Production* 2016, 137, 652–666, doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.142.
33. Hagelüken, C. Recycling of Electronic Scrap at Umicore’s Integrated Metals Smelter and Refinery. *Proceedings - European Metallurgical Conference, EMC 2005* 2005, 1, 307–323.
34. Xavier, L.H.; Giese, E.C.; Ribeiro-Duthie, A.C.; Lins, F.A.F. Sustainability and the Circular Economy: A Theoretical Approach Focused on e-Waste Urban Mining. *Resources Policy* 2019, 101467, doi:10.1016/j.resourpol.2019.101467.
35. Işıldar, A.; Rene, E.R.; van Hullebusch, E.D.; Lens, P.N.L. Electronic Waste as a Secondary Source of Critical Metals: Management and Recovery Technologies. *Resources, Conservation and Recycling* 2018, 135, 296–312, doi:10.1016/j.resconrec.2017.07.031.
36. Birloaga, I.; Vegliò, F. Overview on Hydrometallurgical Procedures for Silver Recovery from Various Wastes. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2018, 6, 2932–2938, doi:10.1016/j.jece.2018.04.040.
37. Li, W.; Achal, V. Environmental and Health Impacts Due to E-Waste Disposal in China – A Review. *Science of the Total Environment* 2020, 737, 139745, doi:10.1016/j.scitotenv.2020.139745.
38. Tansel, B. From Electronic Consumer Products to E-Wastes: Global Outlook, Waste Quantities, Recycling Challenges. *Environment International* 2017, 98, 35–45, doi:10.1016/j.envint.2016.10.002.
39. Long, E.; Kokke, S.; Lundie, D.; Shaw, N.; Ijomah, W.; Kao, C. chuan Technical Solutions to Improve Global Sustainable Management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) in the EU and China. *Journal of Remanufacturing* 2016, 6, 1–27, doi:10.1186/s13243-015-0023-6.
40. Iannicelli-Zubiani, E.M.; Giani, M.I.; Recanati, F.; Dotelli, G.; Puricelli, S.; Cristiani, C. Environmental Impacts of a Hydrometallurgical Process for Electronic

Waste Treatment: A Life Cycle Assessment Case Study. *Journal of Cleaner Production* 2017, 140, 1204–1216, doi:10.1016/j.jclepro.2016.10.040.

41. European Parliament and Council Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). 2003.

42. Queiruga, D.; González Benito, J.; Lannelongue, G. Evolution of the Electronic Waste Management System in Spain. *Journal of Cleaner Production* 2012, 24, 56–65, doi:10.1016/j.jclepro.2011.11.043.

43. Salhofer, S.; Steuer, B.; Ramusch, R.; Beigl, P. WEEE Management in Europe and China – A Comparison. *Waste Management* 2016, 57, 27–35, doi:10.1016/j.wasman.2015.11.014.

44. Zeng, X.; Li, J.; Stevels, A.L.N.; Liu, L. Perspective of Electronic Waste Management in China Based on a Legislation Comparison between China and the EU. *Journal of Cleaner Production* 2013, 51, 80–87, doi:10.1016/j.jclepro.2012.09.030.

45. European Parliament and Council Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). 2012, 4.

46. Ongondo, F.O.; Williams, I.D.; Cherrett, T.J. How Are WEEE Doing? A Global Review of the Management of Electrical and Electronic Wastes. *Waste Management* 2011, 31, 714e730.

47. Steuer, B. Is China's Regulatory System on Urban Household Waste Collection Effective? An Evidence-Based Analysis on the Evolution of Formal Rules and Contravening Informal Practices. *Journal of Chinese Governance* 2017, 2, 411–436, doi:10.1080/23812346.2017.1379166.

48. Lundgren, K. *The Global Impact of E-Waste: Addressing the Challenge*; 2012; ISBN 9789221268970.

49. Zeng, X.; Gong, R.; Chen, W.Q.; Li, J. Uncovering the Recycling Potential of “New” WEEE in China. *Environmental Science and Technology* 2016, 50, 1347–1358, doi:10.1021/acs.est.5b05446.

50. Menikpura, S.N.M.; Santo, A.; Hotta, Y. Assessing the Climate Co-Benefits from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Recycling in Japan. *Journal of Cleaner Production* 2014, 74, 183–190, doi:10.1016/j.jclepro.2014.03.040.

51. Ismail, H.; Hanafiah, M.M. An Overview of LCA Application in WEEE Management: Current Practices, Progress and Challenges. *Journal of Cleaner Production* 2019, 232, 79–93, doi:10.1016/j.jclepro.2019.05.329.

52. Dias, P.; Bernardes, A.M.; Huda, N. Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Management: An Analysis on the Australian e-Waste Recycling Scheme. *Journal of Cleaner Production* 2018, 197, 750–764, doi:10.1016/j.jclepro.2018.06.161.
53. Dias, P.; Bernardes, A.M.; Huda, N. Ensuring Best E-Waste Recycling Practices in Developed Countries: An Australian Example. *Journal of Cleaner Production* 2019, 209, 846–854, doi:10.1016/j.jclepro.2018.10.306.
54. BRASIL Lei No 12.305, De 02 De Agosto De 2010. *Diário Oficial da União* 2010, 147, 21.
55. Guarnieri, P.; e Silva, L.C.; Levino, N.A. Analysis of Electronic Waste Reverse Logistics Decisions Using Strategic Options Development Analysis Methodology: A Brazilian Case. *Journal of Cleaner Production* 2016, 133, 1105–1117, doi:10.1016/j.jclepro.2016.06.025.
56. Ghisolfi, V.; Diniz Chaves, G. de L.; Ribeiro Siman, R.; Xavier, L.H. System Dynamics Applied to Closed Loop Supply Chains of Desktops and Laptops in Brazil: A Perspective for Social Inclusion of Waste Pickers. *Waste Management* 2017, 60, 14–31, doi:10.1016/j.wasman.2016.12.018.
57. Reis, C.; Oliveira, D.; Moura, A.; Engel, A. Collection and Recycling of Electronic Scrap: A Worldwide Overview and Comparison with the Brazilian Situation. *Waste Management* 2012, 32, 1592–1610, doi:10.1016/j.wasman.2012.04.003.
58. Sariatli, F. Linear Economy versus Circular Economy: A Comparative and Analyzer Study for Optimization of Economy for Sustainability. *Visegrad Journal on Bioeconomy and Sustainable Development Introduction* This paper discusses presumably the most fundamental, complex and systemic challenges of our days: the foundations, the design and the substantial principles of the economy. Hence, th 2017, 31–34, doi:10.1515/vjbsd-2017-0005.
59. Kirchherr, J.; Reike, D.; Hekkert, M. Conceptualizing the Circular Economy: An Analysis of 114 de Fi Nitions. *Resources, Conservation & Recycling* 2017, 127, 221–232, doi:10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
60. Reike, D.; Vermeulen, W.J. V; Witjes, S. The Circular Economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation & Recycling* 2018, 135, 246–264, doi:10.1016/j.resconrec.2017.08.027.

61. Mudd, G.M. The Environmental Sustainability of Mining in Australia: Key Mega-Trends and Looming Constraints. *Resources Policy* 2010, 35, 98–115, doi:10.1016/j.resourpol.2009.12.001.
62. Cui, J.; Forsberg, E. Mechanical Recycling of Waste Electric and Electronic Equipment: A Review. 2003, 99, 243–263, doi:10.1016/S0304-3894(03)00061-X.
63. Nowakowski, P. A Proposal to Improve E-Waste Collection Efficiency in Urban Mining: Container Loading and Vehicle Routing Problems – A Case Study of Poland. *Waste Management* 2017, 60, 494–504, doi:10.1016/j.wasman.2016.10.016.
64. Kaya, M. Recovery of Metals and Nonmetals from Electronic Waste by Physical and Chemical Recycling Processes. *Waste Management* 2016, 57, 64–90, doi:10.1016/j.wasman.2016.08.004.
65. Gu, F.; Summers, P.A.; Hall, P. Recovering Materials from Waste Mobile Phones: Recent Technological Developments. *Journal of Cleaner Production* 2019, 237, doi:10.1016/j.jclepro.2019.117657.
66. Yamane, L.H.; Moraes, V.T. De; Croce, D.; Espinosa, R.; Alberto, J.; Tenório, S. Recycling of WEEE : Characterization of Spent Printed Circuit Boards from Mobile Phones and Computers. *Waste Management* 2011, 31, 2553–2558, doi:10.1016/j.wasman.2011.07.006.
67. Wang, H.; Zhang, S.; Li, B.; Pan, D.; Wu, Y.; Zuo, T. Recovery of Waste Printed Circuit Boards through Pyrometallurgical Processing: A Review. *Resources, Conservation and Recycling* 2017, 126, 209–218, doi:10.1016/j.resconrec.2017.08.001.
68. Ning, C.; Lin, C.S.K.; Hui, D.C.W.; McKay, G. Waste Printed Circuit Board (PCB) Recycling Techniques. *Topics in Current Chemistry* 2017, 375, doi:10.1007/s41061-017-0118-7.
69. Hao, J.; Wang, Y.; Wu, Y.; Guo, F. Metal Recovery from Waste Printed Circuit Boards: A Review for Current Status and Perspectives. *Resources, Conservation and Recycling* 2020, 157, 104787, doi:10.1016/j.resconrec.2020.104787.
70. 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. *Front. Environ. Sci. Eng.* 2017, 11, doi:10.1007/s11783-017-0995-6.
71. Zhu, N.; Xiang, Y.; Zhang, T.; Wu, P.; Dang, Z.; Li, P.; Wu, J. Bioleaching of Metal Concentrates of Waste Printed Circuit Boards by Mixed Culture of

Acidophilic Bacteria. *Journal of Hazardous Materials* 2011, 192, 614–619, doi:10.1016/j.jhazmat.2011.05.062.

72. Sodha, A.B.; Tipre, D.R.; Dave, S.R. Optimisation of Biohydrometallurgical Batch Reactor Process for Copper Extraction and Recovery from Non-Pulverized Waste Printed Circuit Boards. *Hydrometallurgy* 2020, 191, 105170, doi:10.1016/j.hydromet.2019.105170.

73. Almeida, G.S.; Cattrall, R.W.; Kolev, S.D. Recent Trends in Extraction and Transport of Metal Ions Using Polymer Inclusion Membranes (PIMs). 2012, 416, 9–23, doi:10.1016/j.memsci.2012.06.006.

74. Jha, R.; Rao, M.D.; Meshram, A.; Verma, H.R.; Singh, K.K. Potential of Polymer Inclusion Membrane Process for Selective Recovery of Metal Values from Waste Printed Circuit Boards : A Review. *Journal of Cleaner Production* 2020, 265, 121621, doi:10.1016/j.jclepro.2020.121621.

75. Duan, H.; Hu, J.; Yuan, W.; Wang, Y.; Yu, D.; Song, Q.; Li, J. Characterizing the Environmental Implications of the Recycling of Non-Metallic Fractions from Waste Printed Circuit Boards. *Journal of Cleaner Production* 2016, 137, 546–554, doi:10.1016/j.jclepro.2016.07.131.

76. Quan, C.; Li, A.; Gao, N.; Dan, Z. Characterization of Products Recycling from PCB Waste Pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2010, 89, 102–106, doi:10.1016/j.jaap.2010.06.002.

77. Oliveira, J.S.S. de Degradação Térmica e Processamento Minero-Metalúrgico de Uma Amostra de Sucata Eletrônica Urbana Juliana Santos Sette de Oliveira Degradação Térmica e Processamento Minero-Metalúrgico de Uma Amostra de Sucata Eletrônica Ur. *Dissertação de Mestrado, PUC-Rio* 2019.

78. Senophiyah-Mary, J.; Loganath, R. A Novel Method of Utilizing Waste Printed Circuit Board for the Preparation of Fibre Reinforced Polymer. *Journal of Cleaner Production* 2020, 246, doi:10.1016/j.jclepro.2019.119063.

79. Kim, E.; Kim, M.; Lee, J.; Pandey, B.D. Selective Recovery of Gold from Waste Mobile Phone PCBs by Hydrometallurgical Process. *Journal of Hazardous Materials* 2011, 198, 206–215, doi:10.1016/j.jhazmat.2011.10.034.

80. Hossain, S.; Naim, A.; Yahaya, A.; Yacob, L.S.; Zulkhairi, M.; Rahim, A.; Nadiyah, N.; Yusof, M.; Bachmann, R.T. ScienceDirect Selective Recovery of Copper from Waste Mobile Phone Printed Circuit Boards Using Sulphuric Acid Leaching. *Materials Today: Proceedings* 2018, 5, 21698–21702, doi:10.1016/j.matpr.2018.07.021.

81. Calgaro, C.O.; Schlemmer, D.F.; Silva, M.D.C.R.; Maziero, E. V; Tanabe, E.H.; Bertuol, D.A. Fast Copper Extraction from Printed Circuit Boards Using

Supercritical Carbon Dioxide. WASTE MANAGEMENT 2015, doi:10.1016/j.wasman.2015.05.017.

82. Sinha, R.; Chauhan, G.; Singh, A.; Kumar, A.; Acharya, S. A Novel Eco-Friendly Hybrid Approach for Recovery and Reuse of Copper from Electronic Waste. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 2018, 6, 1053–1061, doi:10.1016/j.jece.2018.01.030.

83. Haccuria, E.; Ning, P.; Cao, H.; Venkatesan, P.; Jin, W.; Yang, Y.; Sun, Z. Effective Treatment for Electronic Waste - Selective Recovery of Copper by Combining Electrochemical Dissolution and Deposition. *Journal of Cleaner Production* 2017, 152, 150–156, doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.112.

84. Barnwal, A.; Dhawan, N. Recycling of Discarded Mobile Printed Circuit Boards for Extraction of Gold and Copper. *Sustainable Materials and Technologies* 2020, 25, e00164, doi:10.1016/j.susmat.2020.e00164.

85. Liu, K.; Zhang, Z.; Zhang, F.S. Direct Extraction of Palladium and Silver from Waste Printed Circuit Boards Powder by Supercritical Fluids Oxidation-Extraction Process. *Journal of Hazardous Materials* 2016, 318, 216–223, doi:10.1016/j.jhazmat.2016.07.005.

86. Naseri Joda, N.; Rashchi, F. Recovery of Ultra Fine Grained Silver and Copper from PC Board Scraps. *Separation and Purification Technology* 2012, 92, 36–42, doi:10.1016/j.seppur.2012.03.022.

87. Xiu, F.R.; Qi, Y.; Zhang, F.S. Leaching of Au, Ag, and Pd from Waste Printed Circuit Boards of Mobile Phone by Iodide Lixiviant after Supercritical Water Pre-Treatment. *Waste Management* 2015, 41, 134–141, doi:10.1016/j.wasman.2015.02.020.

88. Park, H.S.; Kim, Y.J. A Novel Process of Extracting Precious Metals from Waste Printed Circuit Boards: Utilization of Gold Concentrate as a Fluxing Material. *Journal of Hazardous Materials* 2018, doi:10.1016/j.jhazmat.2018.11.051.

89. Panda, R.; Dinkar, O.S.; Jha, M.K.; Pathak, D.D. Recycling of Gold from Waste Electronic Components of Devices. *Korean Journal of Chemical Engineering* 2020, 37, 111–119, doi:10.1007/s11814-019-0412-x.

90. Tuncuk, A.; Stazi, V.; Akcil, A.; Yazici, E.Y.; Devenci, H. Aqueous Metal Recovery Techniques from E-Scrap: Hydrometallurgy in Recycling. *Minerals Engineering* 2012, 25, 28–37, doi:10.1016/j.mineng.2011.09.019.

91. Akcil, A.; Erust, C.; Gahan, C.S. ekhar; Ozgun, M.; Sahin, M.; Tuncuk, A. Precious Metal Recovery from Waste Printed Circuit Boards Using Cyanide and

Non-Cyanide Lixiviants--A Review. *Waste management* (New York, N.Y.) 2015, 45, 258–271, doi:10.1016/j.wasman.2015.01.017.

92. Alzate, A.; López, M.E.; Serna, C. Recovery of Gold from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Using Ammonium Persulfate. *Waste Management* 2016, 57, 113–120, doi:10.1016/j.wasman.2016.01.043.

93. Hanafi, J.; Jobilong, E.; Christiani, A.; Soenarta, D.C. Material Recovery and Characterization of PCB from Electronic Waste. 2012, 57, 331–338, doi:10.1016/j.sbspro.2012.09.1194.

94. Jing-ying, L.; Xiu-li, X.; Wen-quan, L. Thiourea Leaching Gold and Silver from the Printed Circuit Boards of Waste Mobile Phones. *Waste Management* 2012, 32, 1209–1212, doi:10.1016/j.wasman.2012.01.026.

95. Gurung, M.; Adhikari, B.B.; Kawakita, H.; Ohto, K.; Inoue, K.; Alam, S. Recovery of Gold and Silver from Spent Mobile Phones by Means of Acidothiourea Leaching Followed by Adsorption Using Biosorbent Prepared from Persimmon Tannin. *Hydrometallurgy* 2013, 133, 84–93, doi:10.1016/j.hydromet.2012.12.003.

96. Bourgeois, D.; Lacanau, V.; Mastretta, R.; Contino-Pépin, C.; Meyer, D. A Simple Process for the Recovery of Palladium from Wastes of Printed Circuit Boards. *Hydrometallurgy* 2020, 191, 105241, doi:10.1016/j.hydromet.2019.105241.

97. Yazici, E.Y.; Deveci, H. Extraction of Metals from Waste Printed Circuit Boards (WPCBs) in H₂SO₄-CuSO₄-NaCl Solutions. *Hydrometallurgy* 2013, 139, 30–38, doi:10.1016/j.hydromet.2013.06.018.

98. Zhang, L.; Qu, J.; Sheng, H.; Yang, J.; Wu, H.; Yuan, Z. Urban Mining Potentials of University: In-Use and Hibernating Stocks of Personal Electronics and Students' Disposal Behaviors. *Resources, Conservation and Recycling* 2019, 143, 210–217, doi:10.1016/j.resconrec.2019.01.007.

99. Abalansa, S.; El Mahrhad, B.; Icely, J.; Newton, A. Electronic Waste, an Environmental Problem Exported to Developing Countries: The GOOD, the BAD and the UGLY. *Sustainability* 2021, 13, 5302, doi:10.3390/su13095302.

100. Hu, Y.; Poustie, M. Urban Mining Demonstration Bases in China: A New Approach to the Reclamation of Resources. *Waste Management* 2018, 79, 689–699, doi:10.1016/j.wasman.2018.08.032.

101. Alves, R.; Ferreira, K.L.A.; Lima, R. da S.; Moraes, F.T.F. An Action Research Study for Elaborating and Implementing an Electronic Waste Collection Program in Brazil. *Systemic Practice and Action Research* 2021, 34, 91–108, doi:10.1007/s11213-019-09509-5.

102. Corsini, F.; Gusmerotti, N.M.; Frey, M. Consumer's Circular Behaviors in Relation to the Purchase, Extension of Life, and End of Life Management of Electrical and Electronic Products: A Review. *Sustainability (Switzerland)* 2020, 12, 1–16, doi:10.3390/su122410443.
103. Meirelles, F.S. Pesquisa Anual Do Uso de TI. Fundação Getúlio Vargas - FGV 2020, 162.
104. Inep Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira. Sinopse Estatística Da Educação Superior 2019.; Brasília, 2020;
105. National Bureau of statistics of China China Statistical Yearbook, China Statistics Press. Beijing; Beijing, 2016;
106. Miner, K.J.; Rampedi, I.T.; Ifegbesan, A.P.; Machete, F. Survey on Household Awareness and Willingness to Participate in E-Waste Management in Jos, Plateau State, Nigeria. *Sustainability (Switzerland)* 2020, 12, doi:10.3390/su12031047.
107. Wilson, G.T.; Smalley, G.; Suckling, J.R.; Lilley, D.; Lee, J.; Mawle, R. The Hibernating Mobile Phone: Dead Storage as a Barrier to Efficient Electronic Waste Recovery. *Waste Management* 2016, doi:10.1016/j.wasman.2016.12.023.
108. Pasquali, M. Number of Mobile Phones Stolen in the State of Rio de Janeiro, Brazil from 2010 to 2018, by Type. Statista 2019.
109. BRASIL DECRETO No 10.240, DE 12 DE FEVEREIRO DE 2020. Brasília: Diário Oficial da União 2020.
110. Holgersson, S.; Steenari, B.M.; Björkman, M.; Cullbrand, K. Analysis of the Metal Content of Small-Size Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) Printed Circuit Boards—Part 1: Internet Routers, Mobile Phones and Smartphones. *Resources, Conservation and Recycling* 2018, 133, 300–308, doi:10.1016/j.resconrec.2017.02.011.
111. Valero Navazo, J.M.; Villalba Méndez, G.; Talens Peiró, L. Material Flow Analysis and Energy Requirements of Mobile Phone Material Recovery Processes. *International Journal of Life Cycle Assessment* 2014, 19, 567–579, doi:10.1007/s11367-013-0653-6.
112. Arshadi, M.; Yaghmaei, S.; Esmaeili, A. Evaluating the Optimal Digestion Method and Value Distribution of Precious Metals from Different Waste Printed Circuit Boards. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 2020, 22, 1690–1698, doi:10.1007/s10163-020-01043-0.
113. Islam, M.T.; Huda, N. Assessing the Recycling Potential of “Unregulated” e-Waste in Australia. *Resources, Conservation and Recycling* 2020, 152, 104526, doi:10.1016/j.resconrec.2019.104526.

114. Torihara, K.; Kitajima, T.; Mishima, N. Design of a Proper Recycling Process for Small-Sized e-Waste. *Procedia CIRP* 2015, 26, 746–751, doi:10.1016/j.procir.2014.07.088.
115. Chancerel, P.; Rotter, S. Recycling-Oriented Characterization of Small Waste Electrical and Electronic Equipment. *Waste Management* 2009, 29, 2336–2352, doi:10.1016/j.wasman.2009.04.003.
116. Kohl, C.A.; Gomes, L.P. Physical and Chemical Characterization and Recycling Potential of Desktop Computer Waste, without Screen. *Journal of Cleaner Production* 2018, 184, 1041–1051, doi:10.1016/j.jclepro.2018.02.221.
117. Kumar, A.; Holuszko, M.E.; Janke, T. Characterization of the Non-Metal Fraction of the Processed Waste Printed Circuit Boards. *Waste Management* 2018, 75, 94–102, doi:10.1016/j.wasman.2018.02.010.
118. Oliveira, J.S.S.; Hacha, R.R.; D'almeida, F.S.; Almeida, C.A.; Moura, F.J.; Brocchi, E.A.; Souza, R.F.M. Electronic Waste Low-Temperature Processing: An Alternative Thermochemical Pretreatment to Improve Component Separation. *Materials* 2021, 14, doi:10.3390/ma14206228.
119. JGraph Ltd Diagrams.Net.
120. Kaya, M. Recovery of Metals and Nonmetals from Electronic Waste by Physical and Chemical Recycling Processes. *Waste Management* 2016, 57, 64–90, doi:10.1016/j.wasman.2016.08.004.
121. Becci, A.; Amato, A.; Rodríguez Maroto, J.M.; Beolchini, F. Prediction Model for Cu Chemical Leaching from Printed Circuit Boards. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2019, 58, 20585–20591, doi:10.1021/acs.iecr.9b04187.
122. Azevedo, L.P.; Araújo, F.G. da S.; Lagarinhos, C.A.F.; Tenório, J.A.S.; Espinosa, D.C.R. Resource Recovery From E-Waste for Environmental Sustainability: A Case Study in Brazil. In *Electronic Waste Management and Treatment Technology*; Elsevier, 2019; pp. 175–200 ISBN 9780128161906.
123. León, M.; Silva, J.; Carrasco, S.; Barrientos, N. Design, Cost Estimation and Sensitivity Analysis for a Production Process of Activated Carbon Fromwaste Nutshells by Physical Activation. *Processes* 2020, 8, doi:10.3390/PR8080945.
124. Peter, M.; Timmerhaus, K. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*, 4th Ed.; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1991.
125. London Metal Exchange Metal Prices Available online: <https://www.lme.com/> (accessed on 31 July 2021).

126. Qian, Y.; Ralescu, D.A.; Zhang, B. The Analysis of Factors Affecting Global Gold Price. *Resources Policy* 2019, 64, 101478, doi:10.1016/j.resourpol.2019.101478.
127. Qadan, M. Risk Appetite and the Prices of Precious Metals. *Resources Policy* 2019, 62, 136–153, doi:10.1016/j.resourpol.2019.03.007.
128. Nadiri, M.I.; Prucha, I.R. ESTIMATION OF THE DEPRECIATION RATE OF PHYSICAL AND R&D CAPITAL IN THE U.S. TOTAL MANUFACTURING SECTOR. *Economic Inquiry* 1996, 34, 43–56, doi:ISSN 0095-258.
129. Banco Central do Brasil Relatório de Inflação Available online: <https://www.bcb.gov.br/content/ri/relatorioinflacao/202103/ri202103p.pdf> (accessed on 18 August 2021).
130. Silva, T.R.; Barros, R.M.; Tiago Filho, G.L.; dos Santos, I.F.S. Methodology for the Determination of Optimum Power of a Thermal Power Plant (TPP) by Biogas from Sanitary Landfill. *Waste Management* 2017, 65, 75–91, doi:10.1016/j.wasman.2017.04.018.
131. Lopes, D. de C.; Steidle Neto, A.J.; Mendes, A.A.; Pereira, D.T.V. Economic Feasibility of Biodiesel Production from Macauba in Brazil. *Energy Economics* 2013, 40, 819–824, doi:10.1016/j.eneco.2013.10.003.
132. Guo, X.; Qin, F.G.F.; Yang, X.; Jiang, R. Study on Low-Temperature Pyrolysis of Large-Size Printed Circuit Boards. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 2014, 105, 151–156, doi:10.1016/j.jaap.2013.10.014.
133. Kumari, A.; Jha, M.K.; Singh, R.P. Recovery of Metals from Pyrolysed PCBs by Hydrometallurgical Techniques. *Hydrometallurgy* 2016, 165, 97–105, doi:10.1016/j.hydromet.2015.10.020.
134. Sun, J.; Wang, W.; Liu, Z.; Ma, C. Recycling of Waste Printed Circuit Boards by Microwave-Induced Pyrolysis and Featured Mechanical Processing. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2011, 50, 11763–11769, doi:10.1021/ie2013407.
135. Liu, K.; Yang, J.; Hou, H.; Liang, S.; Chen, Y.; Liu, B.; Xiao, K.; Hu, J.; Deng, H. A Facile and Cost-Effective Approach for Copper Recovery from Waste Printed Circuit Boards via a Sequential Mechanochemical / Leaching / Recrystallization Process A Facile and Cost-Effective Approach for Copp. *Environ. Sci. Technol.* 2019, doi:10.1021/acs.est.8b06081.
136. Hsu, E.; Barmak, K.; West, A.C.; Park, A.H.A. Advancements in the Treatment and Processing of Electronic Waste with Sustainability: A Review of Metal Extraction and Recovery Technologies. *Green Chemistry* 2019, 21, 919–936, doi:10.1039/c8gc03688h.

137. Qiu, R.; Lin, M.; Ruan, J.; Fu, Y.; Hu, J.; Deng, M.; Tang, Y.; Qiu, R. Recovering Full Metallic Resources from Waste Printed Circuit Boards: A Refined Review. *Journal of Cleaner Production* 2020, 244, 118690, doi:10.1016/j.jclepro.2019.118690.
138. Kim, J.; Dodbiba, G.; Tanno, H.; Okaya, K.; Matsuo, S.; Fujita, T. Calcination of Low-Grade Laterite for Concentration of Ni by Magnetic Separation. *Minerals Engineering* 2010, 23, 282–288, doi:10.1016/j.mineng.2010.01.005.
139. Diaz, L.A.; Clark, G.G.; Lister, T.E. Optimization of the Electrochemical Extraction and Recovery of Metals from Electronic Waste Using Response Surface Methodology. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2017, 56, 7516–7524, doi:10.1021/acs.iecr.7b01009.
140. Sharma, N.; Chauhan, G.; Kumar, A.; Sharma, S.K. Statistical Optimization of Heavy Metal (Cu²⁺ and Co²⁺) Extraction from Printed Circuit Boards and Mobile Batteries Using Chelation Technology. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 2017, 56, 6805–6819, doi:10.1021/acs.iecr.7b01481.
141. Alvarado, S. Long Term Energy-Related Environmental Issues of Copper Production. *Energy* 2002, 27, 183–196, doi:10.1016/S0360-5442(01)00067-6.
142. Xing, W.D.; Sohn, S.H.; Lee, M.S. A Review on the Recovery of Noble Metals from Anode Slimes. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* 2020, 41, 130–143, doi:10.1080/08827508.2019.1575211.
143. Biswas, B.K.; Inoue, K.; Ohto, K.; Harada, H.; Kawakita, H.; Hoshino, A. E-Waste Management through Silver Recovery from Scrap of Plasma TV Monitors. *Proc. of International Conference on Environmental Aspects of Bangladesh (ICEAB10)*, Japan, 2010, 207–209.
144. Marchal, G. Industrial Experience with Clinker Grinding in the HOROMILL/Sup R/. In *Proceedings of the 1997 IEEE/PCA Cement Industry Technical Conference. XXXIX Conference Record (Cat. No.97CH36076)*; IEEE, 1997; pp. 195–211.
145. J. Smallwood; C. Robertson; Ravindra K. Dhir; Mukesh C. Limbachiya; Moray D. Newlands *Recovery and Recycling of Paper*; Thomas Telford Ltd, 2001; ISBN 978-0-7277-2993-4.
146. Zhengzhou Shuguang Heavy Machinery Co. Shredder Quote Available online: https://www.alibaba.com/product-detail/Shredder-pto-waste-e-waste-shredder_62459652025.html (accessed on 24 August 2021).
147. Shangqiu Zhongming New Energy Technology Co. Pyrolizer Quote Available online: <https://www.alibaba.com/product-detail/Small-scale-pyrolizer->

with-CE-

ISO_1600251089552.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.33ff1458TyhbOH (accessed on 20 August 2021).

148. Luoyang Zhongde Heavy Industries Co. Ball Grinding Mill Quote Available online: https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-ball-mill-lab-ball-mill_62531081548.html?spm=a2700.details.0.0.1be75f39MJd5HN (accessed on 24 August 2021).

149. Kinetic (Hubei) Energy Equipment Engineering Co. Plate Filter Quote Available online: [https://www.alibaba.com/product-detail/Filtro-Prensa-Recessed-Plate-Filter-](https://www.alibaba.com/product-detail/Filtro-Prensa-Recessed-Plate-Filter-Press_62582402569.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.1cd750b9qsoAqB&s=p)

[Press_62582402569.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.1cd750b9qsoAqB&s=p](https://www.alibaba.com/product-detail/Filtro-Prensa-Recessed-Plate-Filter-Press_62582402569.html?spm=a2700.galleryofferlist.0.0.1cd750b9qsoAqB&s=p) (accessed on 9 August 2021).

150. Qijin Magnet Co. Electrostatic Separator Quote Available online: https://www.alibaba.com/product-detail/Eccentric-Eddy-Current-Separator-Non-Ferrous_62510105383.html?spm=a2700.md_pt_PT.pronpeci14.2.72aa572aZgw09l (accessed on 19 August 2021).

151. Qijin Magnet Co. Magnetic Separator Quote. 2021.

152. Hengshui Aoliande Trading Co. Electrowinning Cells Quote. 2021.