



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de São José dos Campos
Instituto de Ciência e Tecnologia

GUSTAVO ELOY MAIER DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO PRÉ-TRATAMENTO DE RESÍDUOS
ELETROELETRÔNICOS**

São José dos Campos

2024

GUSTAVO ELOY MAIER DE MELLO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO PRÉ-TRATAMENTO DE RESÍDUOS
ELETROELETRÔNICOS**

Trabalho de graduação apresentado como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Unesp.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza

Coorientador: Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino

São José dos Campos

2024

Instituto de Ciência e Tecnologia [internet]. Normalização de tese e dissertação [acesso em 2024]. Disponível em <http://www.ict.unesp.br/biblioteca/normalizacao>

Apresentação gráfica e normalização de acordo com as normas estabelecidas pelo Serviço de Normalização de Documentos da Seção Técnica de Referência e Atendimento ao Usuário e Documentação (STRAUD).

Mello, Gustavo Eloy Maier

Avaliação da eficiência energética no pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos / Gustavo Eloy Maier Mello. - São José dos Campos : [s.n.], 2024.

37 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, 2024.

Orientador: Ricardo de Souza Gabbay

Coorientador: Marcos Yutaka Shiino

1. Resíduos industriais. 2. Instalações elétricas. 3. Máquinas elétricas Corrente alternada. 4. Sistemas de energia elétrica Proteção. I. Gabbay, Ricardo de Souza, orient. II. Shiino, Marcos Yutaka, coorient. III. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos. IV. Universidade Estadual Paulista 'Júlio de Mesquita Filho' - UNESP. V. Universidade Estadual Paulista (UNESP). VI. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Yutaka Shiino (coorientador)

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Unesp.

Instituto de ciências e tecnologia

Departamento de Engenharia Ambiental

Prof. Dr. Antonio Carlos Varela Saraiva

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Unesp.

Instituto de ciências e tecnologia

Departamento de Engenharia Ambiental

Prof. Dr. Irineu de Brito Junior

Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Unesp.

Instituto de ciências e tecnologia

Departamento de Engenharia Ambiental

São José dos Campos, 25 de outubro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço profundamente aos meus orientadores, Prof. Ricardo Gabbay e Prof. Marcos Shiino, pela orientação, apoio, motivação e paciência durante toda a minha iniciação científica. Seus ensinamentos e conhecimentos foram essenciais para o meu desenvolvimento.

Agradeço à PIBIC do edital 09/2023 pelo recurso financeiro que possibilitou a realização deste projeto, proporcionando produção do conhecimento científico.

Por fim, agradeço aos meus colegas, cuja colaboração e amizade tornaram essa jornada ainda mais especial. A todos, meu sincero agradecimento!

*“Não é a força, mas a constância dos bons resultados que conduz os homens à
felicidade.”*

Friedrich Nietzsche

RESUMO

MELLO, Gustavo Eloy. **Avaliação da eficiência energética no pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos**. 2024. Trabalho de graduação (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Ciência e Tecnologia, São José dos Campos, ano de defesa.

O resíduo de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), conhecido como lixo eletrônico, é composto por dispositivos descartados ao final de sua vida útil ou devido à obsolescência. No Brasil, o REEE é classificado em quatro categorias principais: eletrodomésticos, monitores, aparelhos de uso doméstico e dispositivos de informática e comunicação, com uma geração crescente de 20 a 25% ao ano. Em 2019, o país gerou aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de REEE, conforme o Global E-Waste Monitor 2020. Para enfrentar o desafio de destinação adequada, foi adotada a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com foco na gestão adequada e na logística reversa. Ainda assim, a reciclagem de REEE é dificultada pela complexidade de sua composição, que inclui metais preciosos, tóxicos, plásticos e outros materiais. Desta forma, ao pré-tratamento, com processos como desmontagem, separação magnética e por corrente Eddy, é essencial para viabilizar a reciclagem. Considerando a energia dos processos como parâmetros decisivos no valor da reciclagem, este trabalho mediu as correntes elétricas de um sistema de pré-tratamento de REEE em uma empresa localizada em São José dos Campos - SP, correlacionando a demanda energética ou potência requerida dos equipamentos com o tipo de eletroeletrônico. As medições foram realizadas de acordo com as normas de segurança, visando a prevenção de acidentes. Os resultados indicaram que mais da metade da energia consumida é destinada à separação de materiais, com um consumo superior à média para a separação de ferrosos e não ferrosos; e a separação de plásticos foi menos eficaz. Como recomendação, sugere-se a separação dos REEE por classes durante o descarte, o que pode reduzir os custos energéticos e melhorar a eficiência na separação dos plásticos.

Palavras-chave: Resíduos industriais, instalações elétricas, máquinas elétricas corrente alternada, sistemas de energia elétrica Proteção.

ABSTRACT

MELLO, Gustavo Eloy. **Assessment of energy efficiency in the pre-treatment of electronic waste.** 2024. *Undergraduate thesis (Environmental Engineering Degree) – São Paulo State University (Unesp), Institute of Science and Technology, São José dos Campos, ano de defesa.*

The waste from electronic and electrical equipment (WEEE), known as electronic waste, consists of devices discarded at the end of their useful life or due to obsolescence. In Brazil, WEEE is classified into four main categories: household appliances, monitors, household devices, and information and communication devices, with an increasing generation rate of 20 to 25% per year. In 2019, the country generated approximately 2.1 million tons of WEEE, according to the Global E-Waste Monitor 2020. To address the challenge of proper disposal, the National Solid Waste Policy (PNRS) was adopted, focusing on proper management and reverse logistics. However, the recycling of WEEE is complicated by the complexity of its composition, which includes precious metals, toxic substances, plastics, and other materials. Thus, pre-treatment processes such as disassembly, magnetic separation, and Eddy current separation are essential to enable recycling. Considering the energy consumption of the processes as a key factor in the recycling value, this study measured the electric currents of a WEEE pre-treatment system in a company located in São José dos Campos, SP, correlating the energy demand or power required by the equipment with the type of electronic device. The measurements were carried out in accordance with safety standards to prevent accidents. The results indicated that more than half of the energy consumed is used for material separation, with higher-than-average consumption for the separation of ferrous and non-ferrous metals; meanwhile, plastic separation was less effective. As a recommendation, it is suggested to separate WEEE by categories during disposal, which could reduce energy costs and improve the efficiency of plastic separation.

Keywords: Industrial waste, electrical installations, alternating current electrical machines, electrical power systems protection.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABDI	Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial
EPC	Equipamento de proteção Coletiva
EPI	Equipamento de proteção Individual
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
NR	Norma Regulamentadora
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
REEE	Resíduo de equipamentos eletroeletrônicos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1 Norma regulamentadora.....	14
2.1.1 Equipamentos de proteção Coletiva.....	14
2.1.2 Zona de risco e zona controlada.....	15
2.2 Processos de pré-tratamento de REEE.....	17
2.3 Processamentos físicos: redução de tamanho e separação.....	17
2.4. Desmontagem dos equipamentos.....	17
2.5 Processo de separação magnética.....	18
2.6 Processo de separação por corrente Eddy.....	18
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	20
3.1 Definição do tema.....	20
3.2 Realização da revisão da literatura.....	21
3.4 Aplicação de entrevista aos engenheiros da área de estudo.....	21
3.5 Mapeamento das linhas de produção.....	21
3.6 Caracterização e quantificação dos insumos de entrada.....	22
3.7 Medição da corrente elétrica dos equipamentos.....	24
3.8 Análise de dados de energia.....	24
4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	26
4.1 Mapeamento das linhas de produção.....	26
4.2 Caracterização do resíduo de entrada.....	27
4.3 Dados de corrente e energia gasta.....	29
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	35

1 INTRODUÇÃO

O resíduo de equipamentos eletroeletrônicos (REEE), também conhecido como lixo eletrônico, refere-se a equipamentos eletroeletrônicos descartados, que atingiram o fim de sua vida útil ou não são mais desejados pelos usuários (Brasil, 2010). A Associação Brasileira de Desenvolvimento Industrial (ABDI) divide o REEE em quatro classes: (i) linha branca: refrigeradores, lavadoras de roupa e louça, fogões; (ii) linha marrom: monitores e televisores de tubo, plasma, LCD e LED; (iii) linha azul: batedeiras, liquidificadores, ferros elétricos, furadeiras; e (iv) linha verde: computadores desktops e laptops, tablets e telefones celulares (ABDI, 2013).

A indústria eletrônica tem crescido nas últimas três décadas juntamente com a demanda por eletroeletrônicos. Da mesma forma, a geração de resíduos eletroeletrônicos está aumentando intensamente a uma taxa de 20-25% por ano (Morey et. al., 2021). De acordo com dados do Global E-Waste Monitor 2020, o Brasil gerou aproximadamente 2,1 milhões de toneladas de resíduos eletroeletrônicos em 2019, com uma estimativa de 10 kg per capita.

A fim de enfrentar o desafio crescente do volume de REEEs gerados no Brasil, o país adotou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A PNRS tem como objetivo principal promover a gestão adequada desses resíduos e incentivar a implementação da logística reversa como um instrumento essencial nesse processo. A logística reversa abrange um conjunto de ações de gestão do fluxo reverso de produtos, desde o momento pós-consumo até sua destinação final apropriada (Brasil, 2010).

Normalmente, o REEE contém uma composição química complexa, compreendendo de 40 a 60% de metais, como aço, cobre e alumínio, e metais preciosos de alto valor econômico, como ouro, prata e platina. Outros metais que entram na categoria de tóxicos que compõem o REE são o mercúrio, o chumbo e o cádmio (Blengini et al., 2017). Além disso, eles também podem conter plásticos, vidro e outros materiais não metálicos (Natume e Sant'Anna, 2011).

Essa composição torna a reciclagem de REEE interessante e desafiadora para organizações sociais (Chancerel et al., 2009). Isso ocorre porque a coleta de resíduos urbanos acaba contendo uma mistura de componentes e a sua disposição final é inadequada, sendo os lixões a céu aberto o destino mais comum (Souza, 2020).

A diversidade na composição química do resíduo eletroeletrônico requer um manejo adequado, pois a disposição inadequada pode levar à liberação de substâncias tóxicas no meio

ambiente, representando riscos para a saúde humana e o ecossistema. Portanto, é de extrema importância promover um pré-tratamento, reciclagem e disposição desses resíduos, visando à recuperação dos materiais valiosos e a minimização dos impactos ambientais negativos (Kaya, 2016).

O objetivo do pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos é realizar uma série de etapas preliminares para preparar os resíduos antes de serem submetidos a processos de reciclagem ou descarte adequado. Essas etapas têm como objetivo principal facilitar o manuseio, a separação e a recuperação de materiais valiosos presentes nos resíduos, além de reduzir os potenciais impactos ambientais e riscos à saúde (Hsu et al., 2019).

Diversas operações de pré-tratamento são comumente empregadas, incluindo a desmontagem, separação magnética e o uso de sensores. É importante ressaltar que as configurações dos sistemas de pré-tratamento podem variar de acordo com os recursos disponíveis, às necessidades de reciclagem e as regulamentações locais, buscando atender às especificidades de cada instalação de reciclagem de REEE (Razali, 2015).

A modelagem e simulação são ferramentas que podem auxiliar na maximização da eficiência dos processos de pré-tratamento de REEE. Essas técnicas combinadas permitem criar representações matemáticas ou computacionais de sistemas complexos, o que permite analisar o comportamento do sistema e testar diferentes cenários antes da implementação prática (Khan, 2016). A importância da modelagem e simulação reside na capacidade de identificar possíveis gargalos, otimizar o desempenho, reduzir custos, minimizar riscos, tomar decisões mais informadas e compreender situações reais (Bassanezi, 2015).

O objetivo geral da pesquisa foi avaliar a eficiência energética do pré tratamento e comparar com os dados da literatura. Para atingir o objetivo foi necessário coletar dados de corrente elétrica de equipamentos que compõem uma linha de processo de pré-tratamento de uma empresa dedicada a REEE. Com isso, foi possível avaliar a demanda energética por processos físicos, associando-as aos materiais de entrada monitorados em tempo real e posteriormente avaliar a eficiência de cenários para pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

O referencial teórico foi estruturado com a definição das palavras-chave (resíduo eletroeletrônico, pré-tratamento, corrente, eficiência energética) e com as bases com os periódicos mais relevantes: Scopus e Web of Science. A seguinte combinação foi considerada para busca: (TITLE-ABS-KEY ("electric waste") AND TITLE-ABS-KEY (treatment) AND NOT TITLE-ABS-KEY (plastic)). Foram considerados apenas documentos publicados nos últimos 10 anos para revisão de dados e metodologia, a fim de garantir a inclusão de pesquisas e informações atualizadas. Os estudos relevantes na área levados em consideração no trabalho estão na Tabela 1.

Tabela 1 – Estudos relevantes na área do trabalho

(continua)

Autor	Ano	Título do trabalho
Camargo, P. et. Al.	2022	c-Si PV module recycling: Analysis of the use of a mechanical pre-treatment to reduce the environmental impact of thermal treatment and enhance materials recovery
Hsu. E. et. al.	2019	Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: a review of metal extraction and recovery technologies
Kaya, M.	2016	Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes
Krishna, V.B. et. Al.	2024	Experimental study on excitation phenomena of renewable energy source driven induction generator for isolated rural community loads
Tanguay-Rioux, F. et. al.	2022	A method for assessing the performance of sorting unit operations in a material recovery facility based on waste characterizations

Tabela 1 – Estudos relevantes na área do trabalho

(continua)

Autor	Ano	Título do trabalho
Wang. F. et. al.	2012	The Best-of-2-Worlds philosophy: Developing local dismantling and global infrastructure network for sustainable e-waste treatment in emerging economies
Phillip N. et. al.	2014	Analysis of material recovery facilities for use in life-cycle assessment

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além da revisão da literatura sobre REEE, também foi necessário atender as legislações e normas para a segurança em serviços em equipamentos elétricos dispostos na Tabela 2. As questões de segurança apontadas nesta seção foram necessárias devido ao risco associado às medições em quadros de energia de alta tensão, onde foi conduzida as medições de corrente com método intrusivo para conectar o instrumento.

Tabela 2 – Legislação aplicável ao trabalho

Legislação	Assunto
NBR 5410	Instalações elétricas de baixa tensão
NBR 14039	Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV
NBR 16384	Segurança em eletricidade
NR 01	Disposições gerais e gerenciamento de riscos ocupacionais
NR - 06	Equipamentos de proteção individual - EPI
NR - 10	Segurança em instalações e serviços em eletricidade

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.1 Norma regulamentadora

A Norma Regulamentadora NR 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade, regulamenta que apenas profissionais autorizados estão habilitados a realizar atividades em instalações elétricas. Entretanto, nas operações diárias das empresas, diversas pessoas precisam acessar áreas de serviços elétricos ou utilizar equipamentos elétricos para diferentes tarefas.

Segundo a NR 10, para toda intervenção em instalações elétricas deve ser realizada uma análise preliminar dos riscos utilizando técnicas de análise de risco, com o objetivo de estabelecer medidas preventivas de controle de riscos elétricos ou outros riscos envolvidos, a fim de garantir a segurança e saúde no local de trabalho.

Para controle de riscos, além da análise preliminar, as NR 06 e NR 10 estabelecem os equipamentos de proteção individual, coletiva e treinamentos e informações em segurança e saúde no trabalho. A NR 10, determina ainda a hierarquia das medidas de proteção utilizadas em intervenções em instalações elétricas, porém apenas a NR 06 estabelece os equipamentos de proteção necessários para realizar o serviço.

2.1.1 Equipamentos de proteção Coletiva

A hierarquia para a intervenção em sistemas elétricos prevê como prioritário a desenergização elétrica do sistema, entretanto quando a desenergização não for viável, devem ser adotadas outras medidas de controle, começando pelos Equipamentos de Proteção Coletiva (EPC), como isolamento das partes vivas, obstáculos, barreiras, sinalização, sistemas de seccionamento automático de alimentação ou bloqueio do religamento automático, delimitação das zonas de risco e zona controlada.

A opção de utilizar os equipamentos de proteção individual deve ser considerado apenas se os riscos forem totalmente mitigados pelos EPC's, caso contrário sendo estes específicos para proteção elétrica, os quais constam no “Anexo I - LISTA DE EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO INDIVIDUAL” da NR 06 e estão compilados na Tabela 3.

Tabela 3 – Equipamentos de proteção individual contra choques elétricos

Órgão protegido	Equipamento
Cabeça	Capacete para proteção contra choques elétricos
Membros superiores	Luvas para proteção das mãos contra choques elétricos
Membros inferiores	Calçado para proteção dos pés contra choque elétricos
Corpo inteiro	Vestimenta condutiva para proteção de todo o corpo contra choques elétricos.

Fonte: Brasil (1978).

2.1.2 Zona de risco e zona controlada

Para a realização de intervenções em sistemas elétricos energizados é necessário tomar algumas medidas de controle durante a realização da tarefa. A NR 10 estabelece em seu “Anexo II - ZONA DE RISCO E ZONA CONTROLADA”, a fim da mitigação dos riscos e proteção dos envolvidos, a criação de zonas de risco e zonas de controle segundo Tabela 4 e Fig. 1.

Tabela 4 – Raios de delimitação de zonas de risco, controlada e livre

(continua)

Faixa nominal de tensão Nominal da instalação elétrica em KV	Rr – Raio de delimitação entre zona de risco e zona controlada em metros	Rc – Raio de delimitação entre zona controlada e livre em metros
<1	0,20	0,70
≥ 1 e < 3	0,22	1,22
≥ 3 e < 6	0,25	1,25
≥ 6 e < 10	0,35	1,35
≥ 10 e < 15	0,38	1,38
≥ 15 e < 20	0,40	1,40
≥ 20 e < 30	0,56	1,56
≥ 30 e < 36	0,58	1,58
≥ 36 e < 45	0,63	1,63
≥ 45 e < 60	0,83	1,83
≥ 60 e < 70	0,90	1,90
≥ 70 e < 110	1,00	2,00
≥ 110 e < 132	1,10	3,10

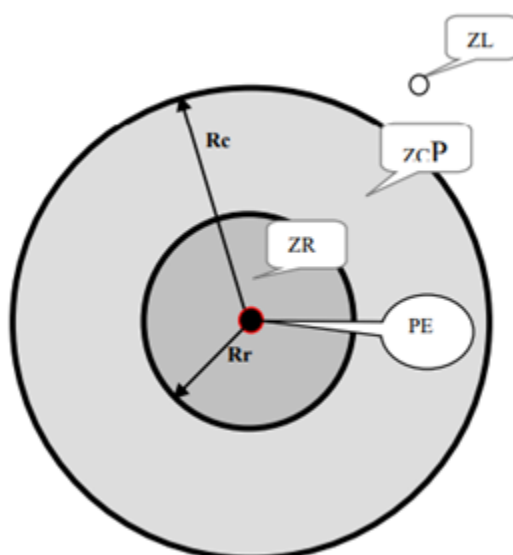
Tabela 4 – Raios de delimitação de zonas de risco, controlada e livre

(conclusão)

Faixa nominal de tensão Nominal da instalação elétrica em KV	Rr – Raio de delimitação entre zona de risco e zona controlada em metros	Rc – Raio de delimitação entre zona controlada e livre em metros
≥ 132 e < 150	1,20	3,20
≥ 150 e < 220	1,60	3,60
≥ 220 e < 275	1,80	3,80
≥ 275 e < 380	2,50	4,50
≥ 380 e < 480	3,20	5,20
≥ 480 e < 700	5,20	7,20

Fonte: Brasil (1978).

Figura 1 – Distâncias no ar que delimitam radialmente as zonas de risco, controlada e livre



Legenda:

ZL = Zona livre

ZC = Zona controlada, restrita a trabalhadores autorizados.

ZR = Zona de risco, restrita a trabalhadores autorizados e com a adoção de técnicas, instrumentos e equipamentos apropriados ao trabalho.

PE = Ponto da instalação energizada.

Fonte: Brasil (1978).

As próximas seções serão dedicadas às etapas do pré tratamento de REEE para correta coleta de dados de consumo de energia.

2.2 Processos de pré-tratamento de REEE

Antes que um pré-processamento seja realizado, é útil verificar as condições dos equipamentos descartados, caso ainda tenham valor agregado é importante reintroduzir o material na cadeia produtiva, respeitando os 3R 's (Reduzir, Reutilizar e Reciclar) (Schluep et. al., 2015).

O pré-tratamento de REEE é complexo devido à mistura de elementos presentes nas placas de comandos dos equipamentos (circuitos), contendo aproximadamente quarenta por cento (40%) de metais, trinta por cento (30%) de óxidos, trinta por cento (30%) de polímeros, além de elementos em porcentagens menores como cobre (Cu), ferro (Fe), alumínio (Al), níquel (Ni) e estanho (Sn) (Hsu et al., 2019).

Os processos iniciais de um pré-tratamento consistem nas pesagens do material, remoção das soldas e desmontagem, com objetivo de minimizar materiais tóxicos da cadeia de reciclagem. Por fim, acontece o processamento físico do material, que envolve as técnicas físicas de separação em frações de metais e não metais (Hsu et al., 2019).

2.3 Processamentos físicos: redução de tamanho e separação

As técnicas de pré-tratamento físico incluem: trituração; pulverização; classificação e separação. Materiais perigosos (baterias, alguns componentes do circuito, lâmpadas e interruptores contendo mercúrio) devem ser removidos do lixo eletrônico antes da reciclagem do metal (Hsu et al., 2019).

O resultado de um processo de pré-tratamento pode ser avaliado sob dois aspectos: a eficiência de recuperação do material (ou seja, metal e não metal) e o impacto ambiental do processamento. Os processos de separação manual se beneficiam de baixos custos operacionais ,porém contam com uma alta perda de metal valioso (10–35%) devido à dificuldade de remoção desses materiais durante o processo de pré-tratamento (Hsu et al., 2019).

2.4. Desmontagem dos equipamentos

A desmontagem de REEE é fundamental por diversas razões. Primeiramente, possibilita a reciclagem eficiente de materiais valiosos, como metais preciosos e plásticos, reduzindo a necessidade de extração de recursos naturais e evitando-se os impactos ambientais associados. Além disso, ajuda a prevenir a poluição, garantindo a remoção segura de substâncias tóxicas presentes nos componentes dos resíduos. Esse processo contribui significativamente para a redução do volume de resíduos enviados para o pré-tratamento, assim facilitando as fases seguintes do processo (Kaya, 2016).

O pré-tratamento de REEE também cria oportunidades econômicas, gerando empregos e receitas através do aproveitamento de materiais preciosos. Por fim, ao promover práticas de desmontagem adequada, é possível aumentar a conscientização sobre a importância da gestão responsável de resíduos e os impactos ambientais do descarte inadequado, incentivando mudanças de comportamento e políticas que favoreçam a sustentabilidade ambiental (Kaya, 2016).

Existem duas formas de desmontagem: a seletiva e a simultânea. A desmontagem seletiva pode ser realizada manualmente ou mecanicamente buscando sempre algumas peças mais valiosas para a reutilização ou revenda do material. Por outro lado, a desmontagem simultânea é mais rápida para maiores quantidades de material (Chi et. al, 2011).

2.5 Processo de separação magnética

Campos magnéticos são gerados quando muitos domínios magnéticos únicos se alinham sob a influência de forças externas. Esses domínios podem ser alinhados pela aplicação de corrente elétrica ou pelo contato físico com outro material magnetizado. Materiais ferrosos são atraídos por campos magnéticos quando suas regiões distintas se alinham com os campos elétricos (Blengini et al., 2017).

É possível magnetizar materiais geralmente ferrosos simplesmente esfregando-os repetidamente contra um ímã. Uma vez que os domínios magnéticos das partículas de ferro estão alinhados e orientados na mesma direção polar, eles criam um campo magnético próprio que pode influenciar outros materiais ferrosos (Blengini et al., 2017).

A separação magnética é empregada para concentrar materiais magnéticos e remover partículas magnetizáveis de correntes (Kaya, 2016). Esse processo é realizado ao passar suspensões ou misturas de partículas por um campo magnético não uniforme. Esse método permite a separação eficiente ou remoção das partículas magnetizáveis. Um resultado semelhante é frequentemente alcançado em contextos diferentes, onde as propriedades magnéticas competem em uma ampla gama de forças e distâncias (Blengini et al., 2017).

2.6 Processo de separação por corrente Eddy

O processo de corrente de Eddy é influenciado pela maneira como partículas condutoras interagem com um campo magnético variável ou atravessam um campo magnético constante, gerando correntes de Eddy dentro delas (Phillip et. al., 2014).

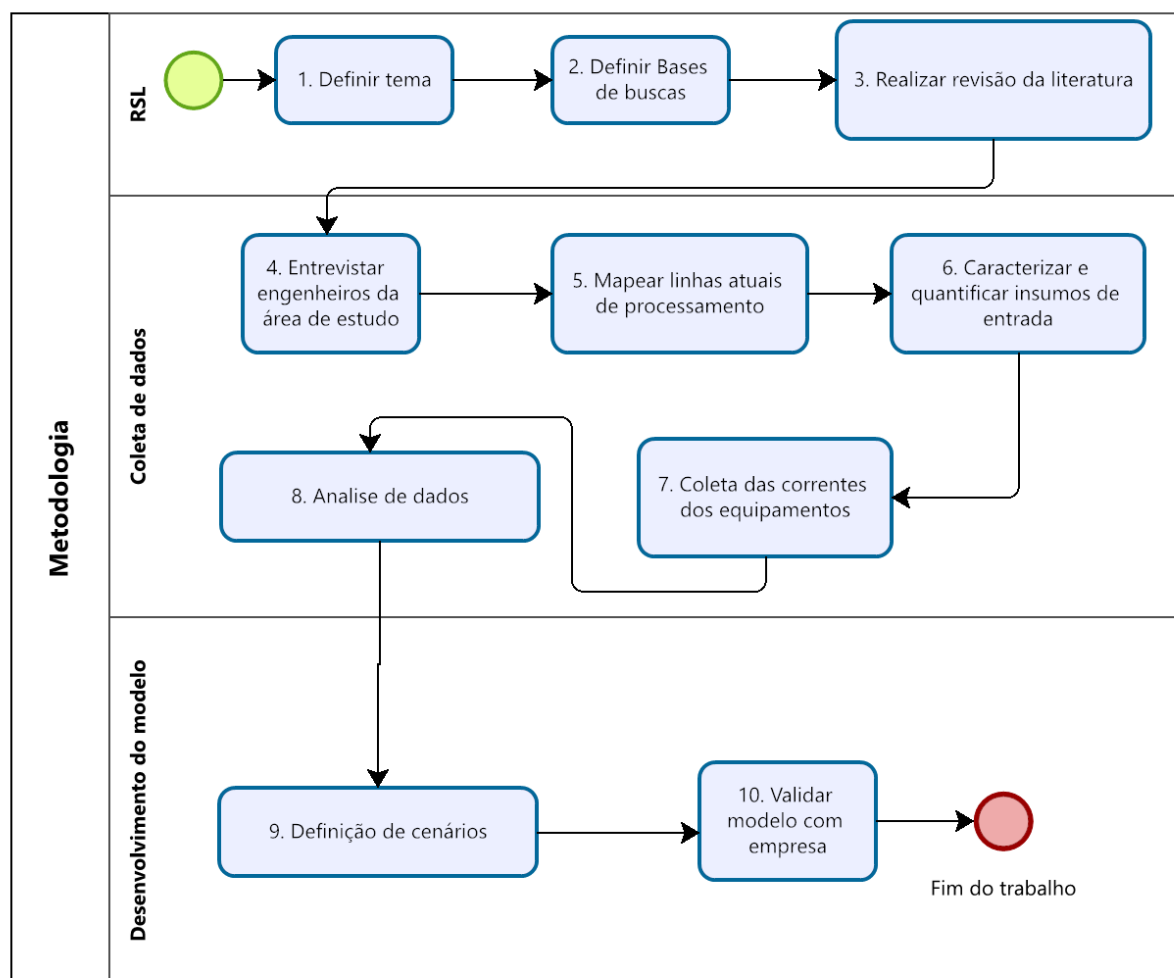
As correntes de Eddy são induzidas de tal forma que o campo magnético resultante contradiz o campo magnético externo em conformidade com a lei de Lenz (Phillip et. al., 2014). A

separação magnética é utilizada para recuperação de alumínio, ou seja, um metal não ferroso (Phillip et. al., 2014)

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia foi dividida em três principais eixos: a Revisão Sistemática da Literatura (RSL), coleta de dados e desenvolvimento do modelo. A Figura 2 apresenta o fluxograma da metodologia descreve as ações de cada eixo que foi aplicado no presente trabalho.

Figura 2 – Fluxograma da metodologia



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.1 Definição do tema

O tema foi definido a partir de um problema na cadeia de pré tratamento por meio de um trabalho de cooperação entre o Prof. Ricardo Gabbay de Souza e uma empresa de reciclagem de REEE. Com isso, o tema foi definido como a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) do resíduo tratado pela empresa, sendo uma das partes a realização de uma avaliação da eficiência energética dos equipamentos do pré-tratamento.

3.2 Realização da revisão da literatura

A seleção de artigos foi conduzida a partir da definição das palavras-chave e bases de buscas de periódicos (Scopus e Web of Science). A busca foi realizada a partir dos termos “WEEE”, “E-waste”, “waste electrical”, “electronic equipment”, “mechanical sorting” “mechanical processing”, “materials sorting”, “energy consumption”, “electricity consumption”, “energy demand”, “energy efficiency”, com os operadores booleanos “AND – E” e o uso do “OR – OU”.

Com a busca, resultou-se em 15 artigos, os quais foram organizados em uma tabela no Excel e classificados de acordo com o tipo de resíduo processado, as operações de pré-tratamento analisadas, o método utilizado e o principal aprendizado de cada estudo.

3.4 Aplicação de entrevista aos engenheiros da área de estudo

Inicialmente foi conduzida uma visita às operações e entrevistas com os funcionários com objetivo de obter informações prévias das linhas de processos de reciclagem e equipamentos utilizados para sugestões e ajustes no projeto se aplicável. O entrevistado foi o funcionário Henrique Mendes (responsável pela operação da empresa) e ocorreu no dia 29 de agosto de 2023 no próprio ambiente de reciclagem, juntamente com o professor orientador da pesquisa, Ricardo Gabbay de Souza, teve uma duração de aproximadamente 2 (duas) horas. As perguntas foram em relação à estrutura que a empresa utiliza para o pré-tratamento do material.

Logo após a entrevista, pode-se avaliar a linha de produção para melhor entendimento dos processos realizados, como estavam dispostos e locais para realizar a medição da corrente e obter a energia total de cada processo via potência nominal dos equipamentos.

No dia 20 de março de 2024 foi realizada outra visita, desta vez com intuito de realizar as medições de corrente em função do tempo, juntamente com um profissional habilitado pela NR-10 e com o EPI adequado, além do protetor auricular pelo ruído produzido pelo local fornecido pela empresa.

Por fim, realizou-se uma última visita para medição final da corrente dos equipamentos. Nesta ocasião, não foi necessário abrir o quadro de luz dos equipamentos, pois um display mostrava as correntes dos trituradores, infelizmente não foi possível obter as correntes dos outros equipamentos.

3.5 Mapeamento das linhas de produção

A elaboração de mapas de processos oferece uma representação abrangente de todo o processo por meio de técnicas que possibilitam a documentação completa de todos os elementos

que constituem um processo e, se aplicadas de maneira adequada, permitem a identificação e a correção de qualquer componente problemático (Melo, 2008).

O fluxograma é uma ferramenta de apresentação esquemática do mapeamento das linhas de produção, possibilitando uma visão mais ampla do fluxo de trabalho ou passagem dos resíduos e suas respectivas saídas (Debastiani, 2015).

Portanto, a ferramenta escolhida para esquematizar o mapeamento de processos foi o fluxograma seguindo recomendações da literatura. O fluxograma elaborado com auxílio do programa Bizagi Modeler, detalha como estão ordenados os processos de separação do resíduo e as entradas e saídas de matérias. Desta forma, foi possível uma melhor visualização e compreensão da linha de produção, facilitando a decisão de escolha dos pontos de coleta das correntes e amostras de resíduos.

Foram selecionados seis locais para medições e escolhidos estrategicamente para que fosse possível fragmentar cada etapa e definir as respectivas energias e a energia global consumida no pré-tratamento.

3.6 Caracterização e quantificação dos insumos de entrada

Os multímetros convencionais de medição não são adequados para medições de correntes elevadas, acima de 20 A (vinte amperes), portanto foi necessário a adequação de outro método. Há três outros métodos que são indicados para medição de correntes acima de 20 A, sendo eles: um “shunt” de corrente, transformador de intensidade e ou uma pinça amperimétrica (Chi et. al., 2011).

Para quantificar potência de entrada do sistema foi adotado o método de aferição por pinça amperimétrica, devido a facilidade de aplicação em medições que demandam uma maior mobilidade, enquanto os outros dois métodos estão relacionados a medições fixas, sugerida pelo Prof. Antonio Carlos Varela Saraiva que faz parte do corpo docente do Departamento de Engenharia Ambiental do Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (ICT/UNESP) - Câmpus de São José dos Campos.

O instrumento utilizado foi o multímetro digital com alicate amperímetro da marca FOXLUX, Fig. 3 que segundo as informações do fabricante, é adequado para medir corrente alternada de até 1000 A, como apresentado na Tabela 5.

Figura 3 – Equipamento utilizado para aferição da corrente.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Especificações técnicas do multímetro utilizado nas medições.

Parâmetros	Unidades e escala
Faixas de Medida	AC A, AC V, DC V, Ohms, Data Hold AC A e Continuidade
Método de Medida	Sistema de conversão A/D com integração de rampa dupla
Diâmetro do condutor	51 mm (máximo)
Abertura da Garra	51 mm (máximo)
Ambiente de Operação	0°C a 40°C, umidade <70%
Ambiente de Armazenamento	-10°C a 50°C, umidade <80%
Alimentação	1 bateria de 9V
Display	LCD dígitos, leitura máxima 1999
Sobrefaixa	Aparece “1” ou “-1” no dígito mais significativo
Polaridade	Automática, negativa (-) indicada

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7 Medição da corrente elétrica dos equipamentos

A coleta da corrente elétrica dos equipamentos foi realizada utilizando o multímetro mencionado anteriormente. Foram realizadas medições a cada 30 segundos durante os 41 minutos de operação dos trituradores. Nos demais equipamentos, o acesso foi mais dificultado, o que resultou em uma única coleta de dados de corrente e tensão.

Os equipamentos de proteção coletiva utilizados no trabalho incluíram cones de sinalização, que desempenharam um papel fundamental na demarcação das zonas de risco e das zonas controladas mínimas. Essa sinalização é essencial para garantir a segurança dos trabalhadores, minimizando o risco de acidentes, orientando sobre as áreas potencialmente perigosas e assegurando que apenas pessoas autorizadas acessem determinadas regiões.

Seguindo as recomendações da NR-06, foi elaborado um *checklist* com os equipamentos necessários para a adequada medição da corrente elétrica, os quais foram empregados na realização dos testes em 21 de agosto de 2024.

3.8 Análise de dados de energia

A energia elétrica consumida por um motor elétrico trifásico é potência aparente (P_p) sistema multiplicada pela variação de tempo (ΔT) medida utilizando um cronômetro, conforme a equação (1). A energia total gasta pelo sistema elétrico entende-se como sendo a soma das energias de cada equipamento mapeado anteriormente, visto na equação (2):

$$E(kWh) = \frac{1}{1000}(k) \cdot P_s(W) \cdot \Delta T(h) \quad (1)$$

$$E_t(kWh) = \sum Energia_k(kWh) \quad (2)$$

onde:

E_t = Energia total do sistema

n = Número de equipamentos

k = Equipamento atual

Para obter a potência ativa (P_a) de uma instalação elétrica trifásica é necessário a soma da potência de cada uma das fases R, S e T (Guedes, 1994) como se pode observar na equação (3).

$$P_a = P_R + P_S + P_T \quad (3)$$

No regime de cargas equilibradas de um motor trifásico, pode-se obter P_p com a medição de apenas uma das correntes, pois a intensidade da corrente é a mesma nas três fases (Guedes,1994). Assim, a corrente nominal (I_n) foi estimada multiplicando a corrente medida I_m por três, conforme apresentado na equação (4).

$$I_n(A) = 3 \cdot I_m(A) \quad (4)$$

Com os dados de I_m e a tensão medida (U_m) é possível estimar a P_p conforme a equação (5). Entretanto a potência aparente (P_a) é a capacidade máxima energia sistema, para estimar P_p é necessário multiplicar a P_a pela raiz de três para motores trifásicos como visto na equação (6).

$$P_s(W) = U(V) \cdot I(A) \sqrt{3} \quad (5)$$

$$P_p(W) = P_a(W) \cdot \sqrt{3} \quad (6)$$

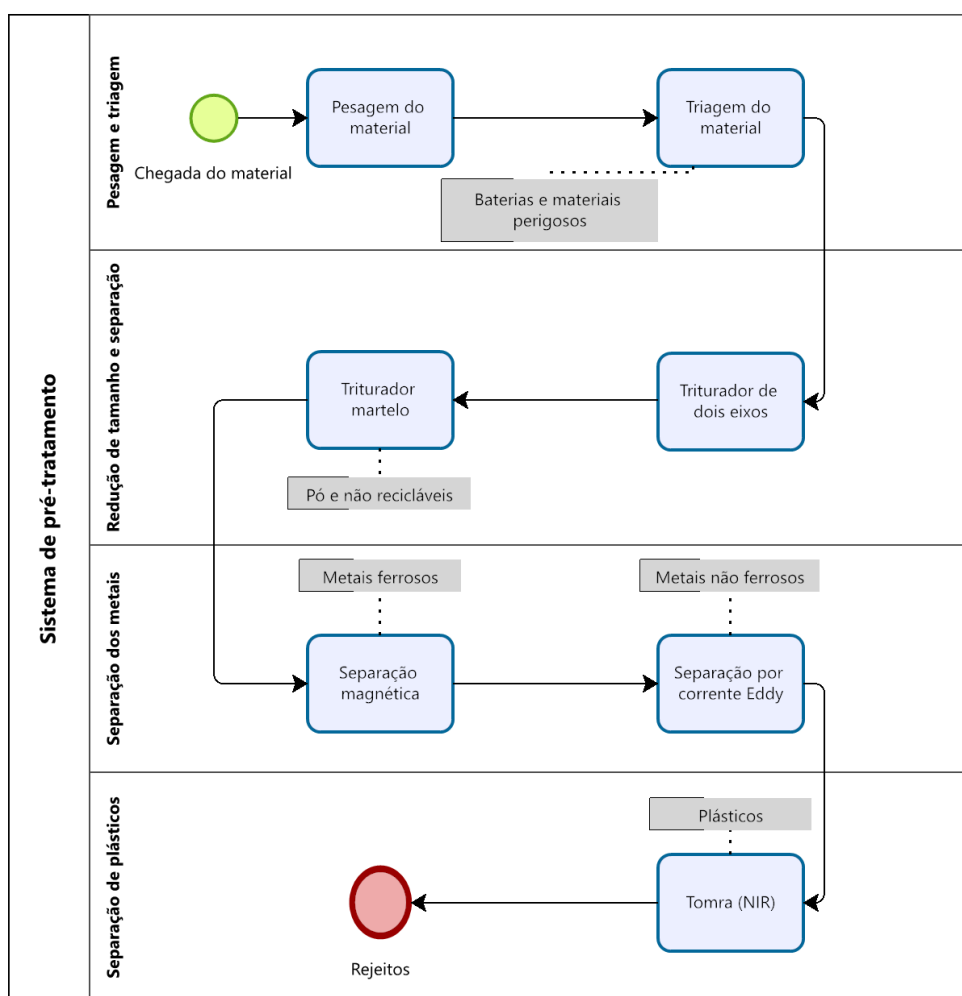
$$I_R = I_S = I_T = I \quad (7)$$

4 RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Mapeamento das linhas de produção

A Figura 4 representa um fluxograma detalhado da disposição dos equipamentos e saídas de resíduos de cada processo. O fluxo de resíduo começa por uma pré-triagem manual em uma esteira rolante. Em seguida o resíduo passa por dois trituradores, um Moinho 1 de dois eixos e Moinho 2 por martelo. Posteriormente a massa de resíduo passa pela separação magnética e separação por corrente Eddy. Ao final, com apenas materiais plásticos, passa pela máquina de separação por tipos de plásticos por NIR (Espectroscopia de Infravermelho Próximo).

Figura 4 – Fluxograma dos processos de pré-tratamento do REEE

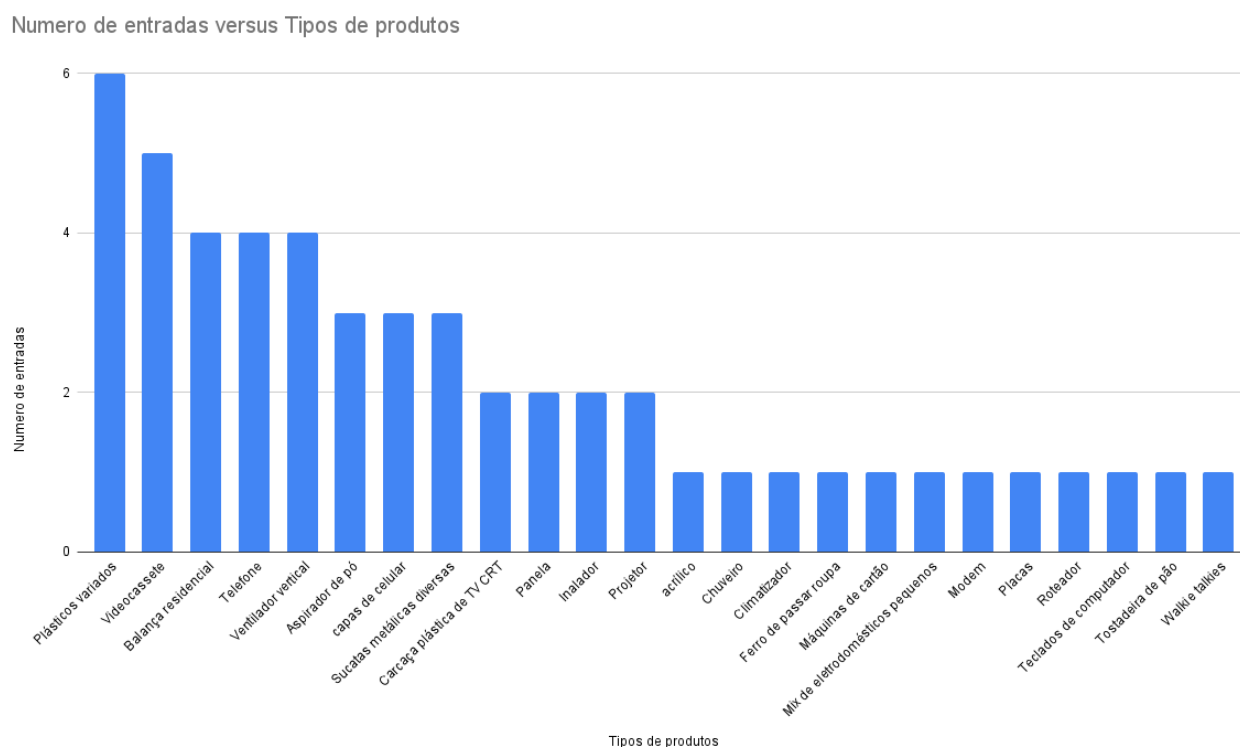


Fonte: Adaptado pelo grupo de estudo ACV da linha de processos de pré-tratamento

4.2 Caracterização do resíduo de entrada

Os materiais de entrada para o sistema de tratamento foram monitorados durante todo o tempo e os itens apresentados na Fig. 5.

Figura 5 – Caracterização dos materiais de entrada



Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado da manufatura reversa dos materiais foi disponibilizado pela própria empresa e reproduzida na Tabela 6 e na Fig. 6.

Tabela 6 – Tipo de resíduo por peso

(continua)

Tipo de resíduo	Peso (Kg)	Porcentagem
Ferro	1.919,36	33,59%

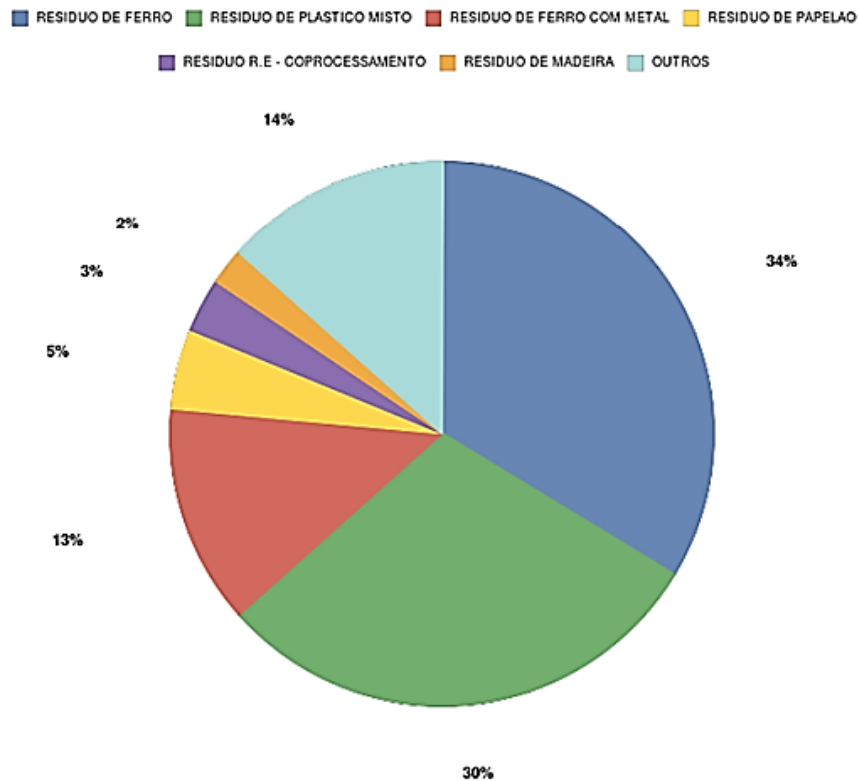
Tabela 6 – Tipo de resíduo de saída por peso

(conclusão)

Tipo de resíduo	Peso (Kg)	Porcentagem
Plástico misto	1.700,00	29,75%
Ferro com metal	745,0	13,04%
Papelão	271,00	4,74%
R.E - Coprocessamento	183,00	3,20%
Madeira	123,50	2,16%
Placa <i>low grade</i>	110,00	1,92%
Plástico PE expandido	83,50	1,46%
Plástico ABS PC colorido	73,52	1,29%
Plástico PP colorido	67,50	1,18%
Cabos diversos	54,00	0,94%
Papel	54,00	0,94%
Contaminante cartucho de tinta	47,50	0,83%
Plástico PVC misto	46,70	0,82%
Outros	245,92	4,14%
Total	5724,30	100%

Fonte: Fornecido pela Empresa.

Figura 6 – Porcentagem de cada resíduo separado pelo pré-tratamento

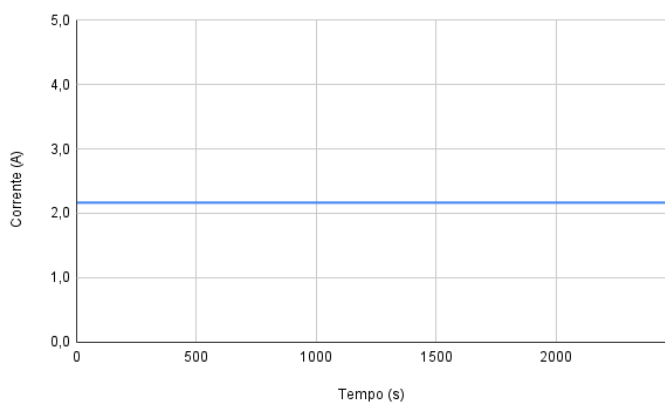


Fonte: Dados fornecidos pela empresa .

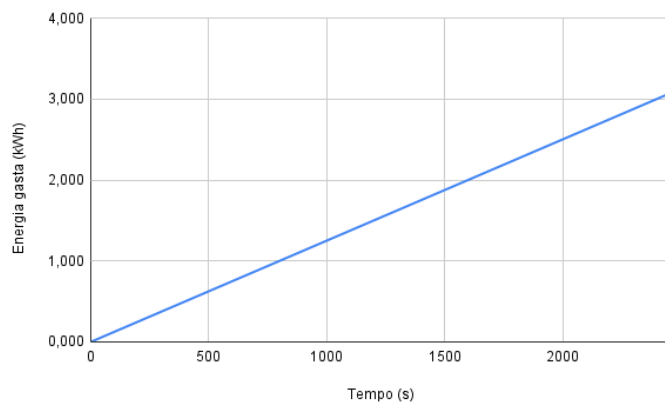
4.3 Dados de corrente e energia gasta

Os resultados da medição de corrente para os equipamentos monitorados estão dispostos nas Figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12 e 13. Os gráficos mostram as variações de corrente ao longo do tempo e permitem uma análise aprofundada do consumo energético de cada dispositivo. Por meio dessa análise, é possível obter informações valiosas sobre o desempenho e a eficiência dos equipamentos, auxiliando na tomada de decisões para a otimização do uso de energia e a redução de custos operacionais.

Figura 7 – Monitoramento na esteira a) Corrente em função do tempo; e b) energia consumida em função do tempo



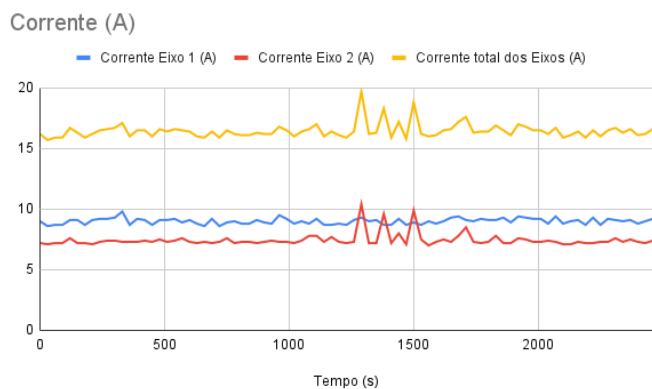
a)



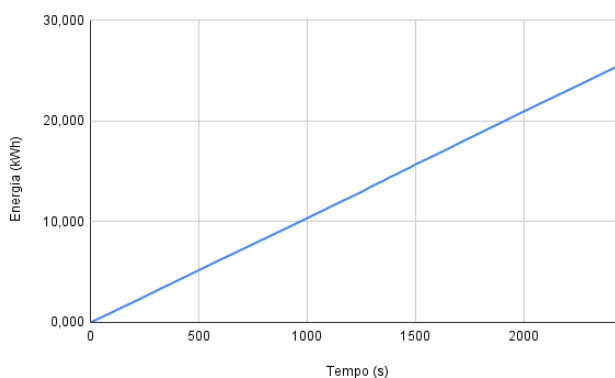
b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Monitoramento no eixo duplo a) Corrente em função do tempo; e b) energia consumida em função do tempo



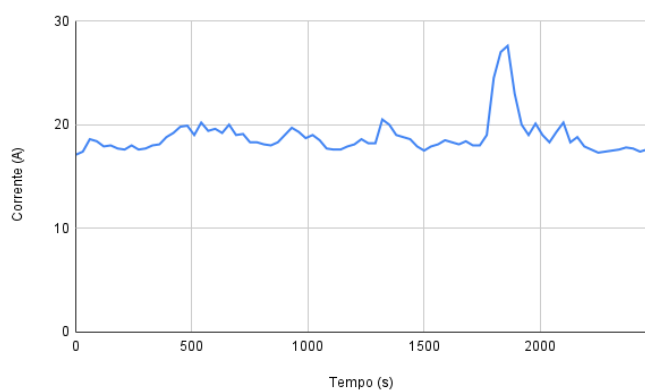
a)



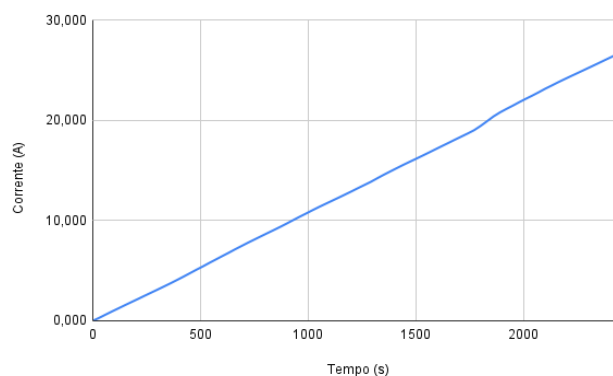
b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 9 – Monitoramento no triturador martelo a) Corrente em função do tempo; e b) energia consumida em função do tempo



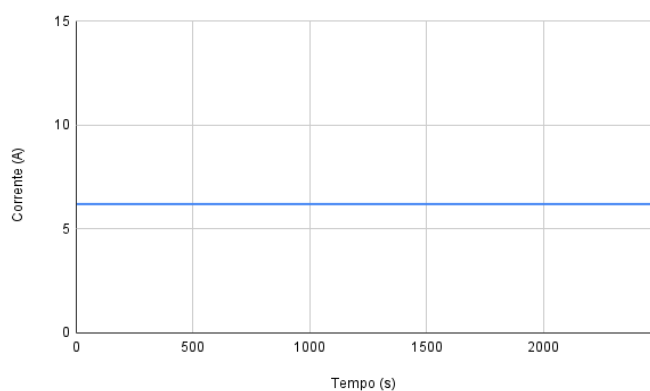
a)



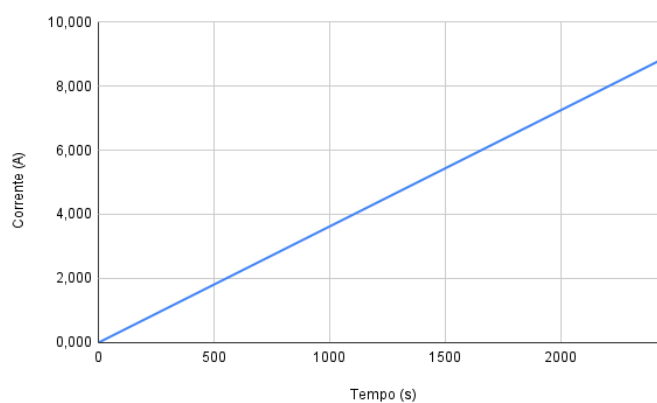
b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Monitoramento no separador magnético a) Corrente em função do tempo; e b) energia consumida em função do tempo



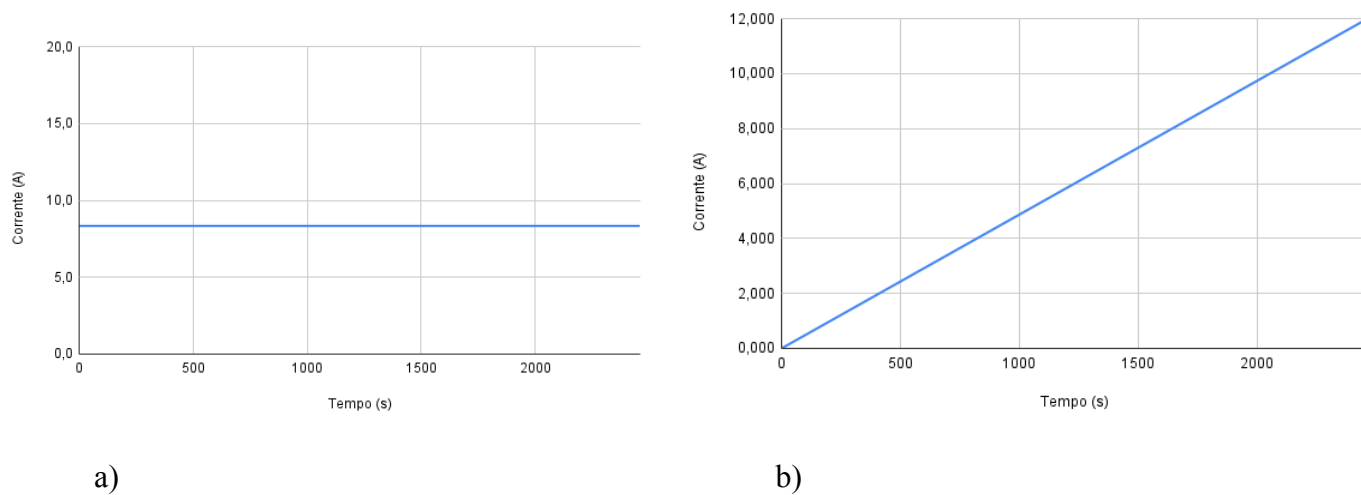
a)



b)

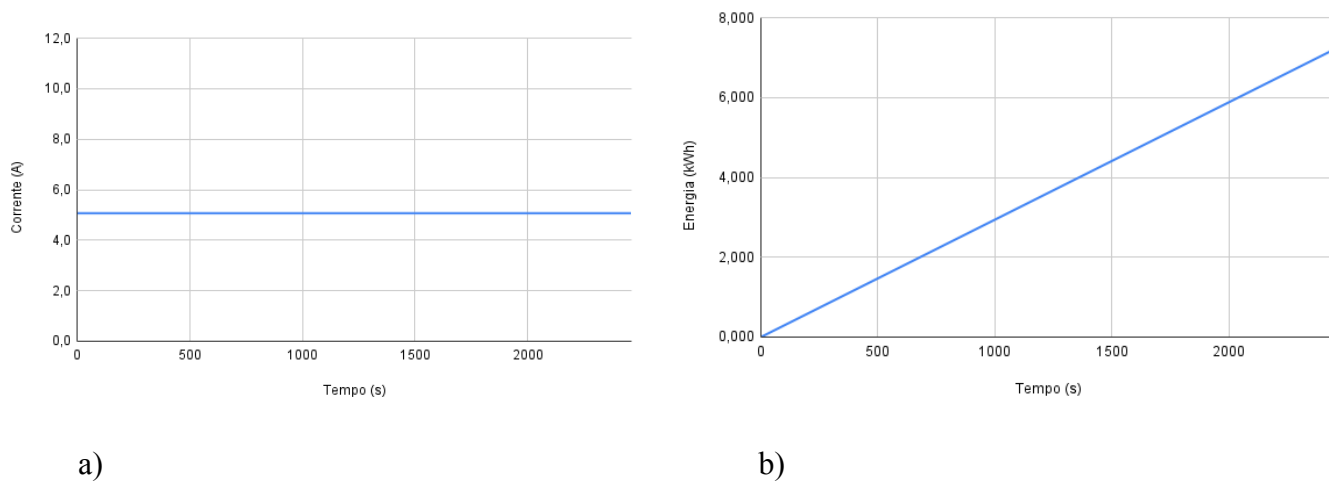
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Monitoramento no separador por corrente Eddy a) Corrente em função do tempo; e b) energia consumida em função do tempo



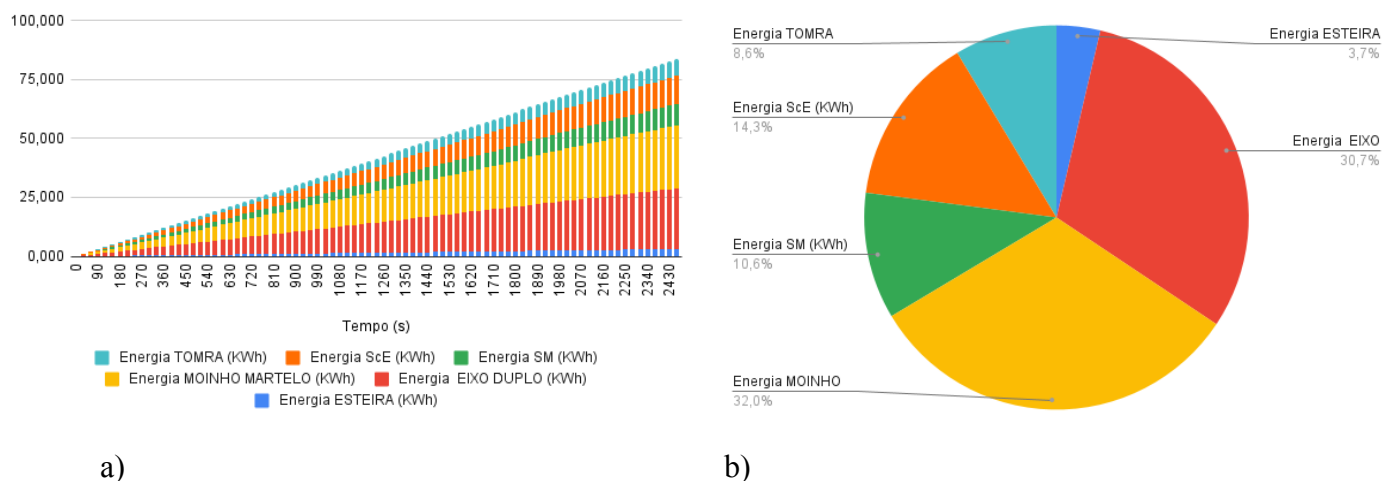
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Monitoramento no TOMRA a) Corrente em função do tempo; e b) energia consumida em função do tempo



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Resultado consolidado: a) energia global do pré-tratamento; e b) percentual de cada gasto energético do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

O modelo desenvolvido assume uma relação linear entre potência e corrente para dimensionar o equipamento, considerando as variações nas composições dos resíduos e nas eficiências de separação. Por exemplo, se a fração de alumínio no fluxo de resíduos diminui e a fração de PET aumenta, a energia efetiva do separador de correntes parasitas reduzirá devido à diminuição da sua produtividade total, enquanto o tamanho do classificador óptico de PET aumentará, uma vez que sua quantidade total na saída do separador aumentará.

A porcentagem de tipo de material separado pelo pré-tratamento está em conformidade com os dados de Kaya (2016), que indicaram em seu estudo 40% fração de metais ferrosos, seguidos por 30% de plásticos e 30% de materiais cerâmicos. No material separado, a fração de materiais ferrosos representou 46% do total, enquanto os plásticos corresponderam a 34% e os materiais cerâmicos a 20%.

O consumo de eletricidade do equipamento varia de acordo com a produtividade e tamanho do motor (Phillip, 2014). Foi o que se constatou no sistema de pré-tratamento, por exemplo, os dois trituradores consomem juntos quase 62% da energia consumida pelo sistema, ou seja, mais da metade da energia é consumida com diminuição da quantidade de material e separação das peças, pois são equipamentos com mais potência para possibilitar a trituração e tamanho adequado para outros processos de separação.

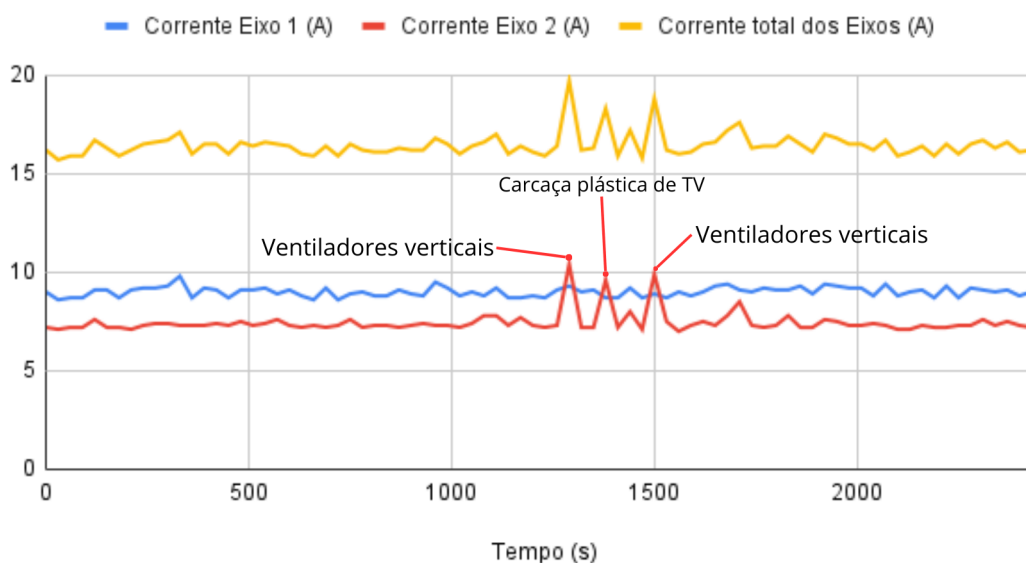
O consumo energético para a separação do alumínio foi de 11,8 kWh, o que representa 14,3%

do consumo total do sistema utilizando o separador por corrente Eddy. Em comparação, a separação do mesmo material consome apenas 3% (Phillip, 2014), sugerindo uma oportunidade para melhorar a eficiência energética, o próprio autor sugere a redução da fração de vidro. Em relação a separação magnética consumiu 8,9 kWh, representando 10,6% do sistema. Além disso, é importante destacar que a separação do alumínio demanda cerca de 34% a mais de energia do que a separação de metais ferrosos.

Por fim, o consumo da TOMRA para a separação de tipos de plástico foi de 7,2 kWh, representando 8,6% do total do sistema. O consumo está de acordo com outros estudos, como os de Phillip (2014) e Kaya (2016), que indicaram um consumo entre 8% e 9% do sistema para a separação de plásticos (PET, ABS, PP e outros).

Durante a medição da corrente elétrica, foi observado uma diferença de 3 minutos entre a entrada do resíduo no fluxo contínuo e o pico de energia registrado nas correntes do triturador. A relação entre a entrada de material e o pico de energia no triturador de dois eixos é possível observar na Fig. 14.

Figura 14 – Indicação do material de entrada com pico de energia



Fonte: Elaborado pelo autor.

O pico de energia está relacionado à potência demandada devido ao tipo e tamanho do material, indicando um maior consumo energético para tarefa, porém a corrente permaneceu constante para outros tipos de materiais.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A energia consumida no pré-tratamento dos resíduos eletroeletrônicos é fundamental para a avaliação do ciclo de vida (ACV) desse tipo de resíduo. A modelagem da energia utilizada por sistemas de separação de materiais é um processo complexo, que exige habilidades específicas para a realização de medições em circuitos elétricos. Além disso, é necessário seguir normas de segurança elétrica e utilizar equipamentos de proteção adequados durante as medições.

Após a adoção das medidas preventivas necessárias, foram obtidos resultados satisfatórios, alinhados com outros estudos, especialmente no que diz respeito à caracterização do resíduo de entrada e ao consumo de energia elétrica durante a separação dos plásticos. No entanto, em relação aos metais, observou-se uma discrepância em relação aos dados de outros autores. Uma solução proposta por um desses estudos é que uma maior atenção ao tipo de material, através de uma seleção mais cuidadosa da entrada, poderia melhorar a produtividade de todos os processos.

Embora existam poucos estudos sobre a avaliação do ciclo de vida dos resíduos eletroeletrônicos (REEE) e o consumo energético de sistemas de pré-tratamento em fluxo contínuo, especialmente com o uso das tecnologias de separação mais avançadas, o trabalho realizado oferece uma contribuição importante. Ele gera dados relevantes para a área, particularmente no que se refere à caracterização do volume de resíduos separados e ao consumo energético associado a esse processo.

A pesquisa realizada permitiu concluir que, ao analisar o balanço energético do pré-tratamento, é um desafio garantir o descarte adequado dos REEE. Portanto, é fundamental que a sociedade compreenda a importância do manejo adequado desses resíduos e cobre das empresas a adoção de práticas responsáveis de descarte. Essa mobilização social desempenha um papel crucial na mitigação dos danos ambientais, promovendo uma gestão mais eficiente e sustentável dos REEE.

REFERÊNCIAS

- ABDI. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos**. Brasília, 2013.
- BASSANEZI, Rodney Carlos. **Modelagem Matemática: teoria e prática**. São Paulo: Contexto, 2015.
- BLENGINI, G. A. et al. **Metodologia da UE para avaliação de matérias-primas críticas: necessidades de políticas e soluções propostas para melhorias incrementais**. Política de Res, v. 53, p. 12-19, 2017.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 3 ago. 2010.
- Bessho K. and Yamada S., Proc. Intern. Symp. on High Field Magnetism, Osaka (1982) p. 323.
- Chancerel, P., Meskers, C. E. M., Hagelüken, C., & Rotter, V. S. (2009). **Assessment of precious metal flows during preprocessing of waste electrical and electronic equipment**. Journal of Industrial Ecology, 13(5), 791–810. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00171.x>
- Baldé C. P., V. Forti, V. Gray, R. Kuehr and P. Stegmann, **The Global E-waste Monitor**, 2017.
- Chi, X., Streicher-Porte, M., Wang, M.Y.L., Reuter, M.A., 2011. **Informal electronic waste recycling: a sector review with special focus on China**. Waste Manage. 31, 731–742
- DEBASTIANI, C. A., Definindo **Escopo em Projetos de Software**. São Paulo: Novatec, 2015.
- GLOBAL E-WASTE MONITOR. **National E-waste Monitors**. Disponível em: <<https://ewastemonitor.info/national-e-waste-monitors/>>. Acesso em: 01 de julho de 2024.
- HSU, E. et al. **Advancements in the treatment and processing of electronic waste with sustainability: a review of metal extraction and recovery technologies**. Green Chem, v. 5, p. 1-20, 2019.
- KAYA, M. **Recovery of metals from electronic waste by physical and chemical recycling processes**. Int. J. Chem. Nucl. Mater. Metall. Eng., v. 10, 2016.
- KHAN, M. A. A.; SHEIKH, A. K. **Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture**, v. 230, n. 10, p. 1799-1817, 2016. doi:10.1177/0954405416640183
- NATUME, R. Y.; SANT'ANNA, F. S. P. **Resíduos Eletroeletrônicos: um desafio para o desenvolvimento sustentável e a nova lei da política nacional de resíduos sólidos**. 3º International Workshop: Advances in Cleaning Production, São Paulo, 2011.
- NR 06 – **Equipamento de Proteção Individual – EPI**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2015. Disponível em: <<http://portal.mte.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR6.pdf>>
- Morey, B., Cummings, J.P. and Griffin, T.D., 1975. **Recovery of small metal particles from**

non-metals using an eddy current separator - experience at Franklin, Ohio. Paper to 104th Ann. Meet. of AIMMPE, New York.

RAZALI, Z. B.; MAT NAWI, N. A. **Automated Segregating Device for Reuse and Recycle Waste: Application on size based, friendly recycling designed**. LAP Lambert Academic Publishing, Germany, 2013.

Razali, Z.B & Madasamy, S. (2012) **An Application of Image Processing for Automated Mixed Household Waste Sorting System**. Paper presented at the International Conference on Man-Machine System (ICoMMS2012), Penang, 27-28 Feb.

ROTHER, M.; SHOOK, J. Aprendendo a enxergar. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2000

SCHLOEMANN, E., 1982. **Eddy-current techniques for segregating nonferrous metals from waste**. Conserv. Recycl., 5 (2/3) : 149-162.

SOUZA, R. G. **E-waste situation and current practices in Brazil**. In: PRASAD, M. N. V. et al. (Eds.). Handbook of Electronic Waste Management: International Best Practices and Case Studies. Cambridge: Elsevier, 2019, p. 377-396.

Sommei, E.J. and Kenny, G.R., 1974. **An electromagnetic system for dry recovery of non-ferrous metals from shredded municipal solid waste**. Proc. 4th Mineral Waste Utilization Symp., Chicago. USBM/IITRI, E. Aleshin (Ed.).

Zhang, S., Forssberg, E., 1997. **Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap**. Resour. Conserv. Recycl. 21, 247–269.