



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"

Programa Interunidades

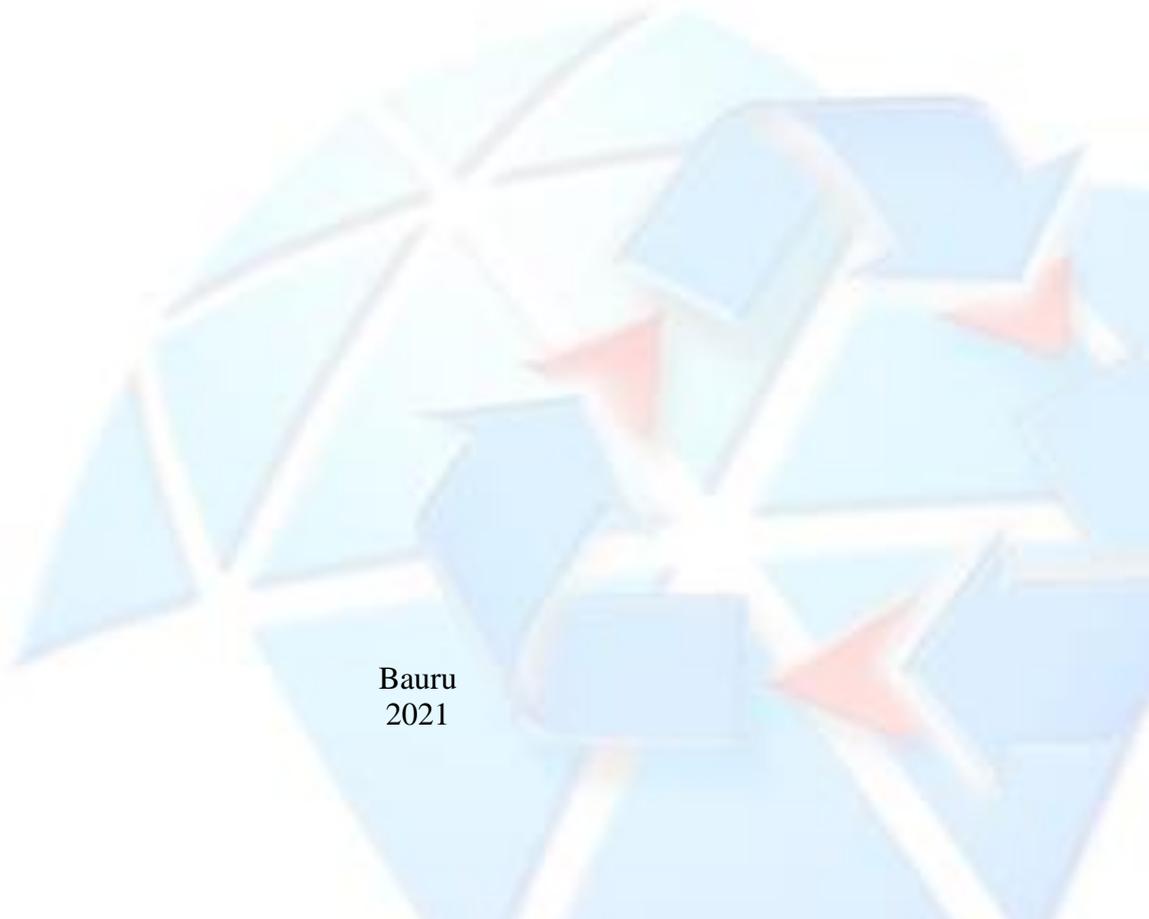
unesp 

Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

INGRID JALE DA SILVA SALES

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA
DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**



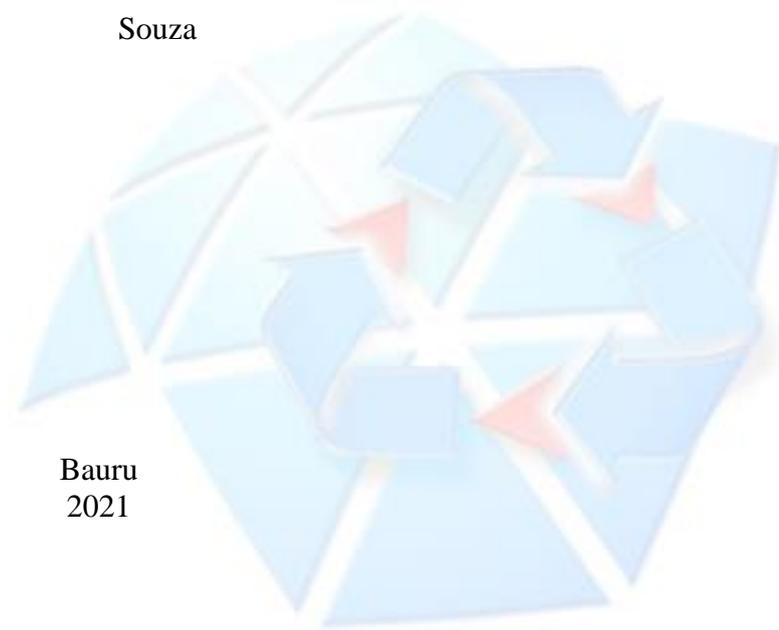
Bauru
2021

INGRID JALE DA SILVA SALES

**ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA
DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Área de Concentração em Saneamento Ambiental e Linha de Pesquisa em Manejo de Resíduos.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Gabbay de Souza



Bauru
2021

S163a

Sales, Ingrid Jale da Silva

Análise de viabilidade de sistema de logística reversa de resíduos eletroeletrônicos em São José dos Campos / Ingrid Jale da Silva Sales.

-- Bauru, 2021

88 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Engenharia, Bauru

Orientador: Ricardo Gabbay de Souza

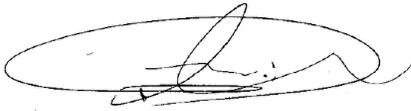
1. Logística reversa. 2. Resíduos eletroeletrônicos. 3. Métodos multicritério. 4. Gestão de resíduos. 5. Viabilidade econômica. I.
Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE INGRID JALE DA SILVA SALES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 06 dias do mês de dezembro do ano de 2021, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de INGRID JALE DA SILVA SALES, intitulada **ANÁLISE DE VIABILIDADE DE SISTEMA DE LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS EM SÃO JOSÉ DOS CAMPOS**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / Instituto de Ciencia e Tecnologia Campus de Sao Jose dos Campos UNESP, Profa. Dra. LÚCIA HELENA XAVIER (Participação Virtual) do(a) COPMA / CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL - CETEM/MCTI, Prof. Dr. VALDECY PEREIRA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia de Produção / Universidade Federal Fluminense. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: _ _ _ _ _ **APROVADA** _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. RICARDO GABBAY DE SOUZA

“Deus me proteja de mim e da maldade de gente boa, da bondade da pessoa ruim.

Deus me governe e guarde, ilumine e zele assim.”

Chico César

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Ronan e Marilene, que sempre falaram da importância do estudo para melhorar nossa qualidade de vida. Por todas as noites que passaram acordados comigo para me dar força e mostrar que não estava sozinha. Por todos os abraços e orações nos momentos mais difíceis que fizeram total diferença. Espero dar muito orgulho pra vocês.

Agradeço a minha irmã, Isabelle, por ser meus olhos quando eles já não conseguiam enxergar mais e por ser minha cabeça quando ela já não funcionava mais. Tenho certeza que você está no caminho certo e estarei sempre aqui para te apoiar.

Agradeço ao meu parceiro de vida e de mestrado, Pedro. Você, mais do que ninguém, conhece a minha luta porque ela também é sua. Você foi fortaleza nos meus momentos de fraqueza. Não poderia ter pessoa melhor para ter ao meu lado.

Agradeço ao meu cachorro, Ig, pelas noites que passou ao meu lado, vigiando o meu sono e descansando por mim até os seus últimos dias. Você foi o melhor companheiro que uma pessoa poderia ter.

Agradeço aos amigos, familiares e colegas de trabalho que se faziam presentes mesmo com a distância e que entendiam minhas ausências por toda loucura que estava passando. Ainda vou compensar todo esse tempo com vocês. Aos que se foram, sempre estarão nas minhas orações e obrigada por me fazerem perceber que o tempo é a coisa mais importante que podemos ter, ele não se recupera.

Agradeço aos médicos que me acompanharam nessa caminhada e tiveram a sensibilidade de perceber que não estava tudo bem, mesmo quando não era especialidade deles. Vocês fizeram a diferença.

Agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Ricardo Gabbay de Souza, por toda paciência e ensinamentos passados ao longo desses últimos anos. Também a todos os professores que estiveram presentes nessa busca constante pelo conhecimento.

Agradeço a UNESP e todos seus funcionários que sempre estiveram dispostos a ajudar da melhor forma a realização desse trabalho.

Agradeço a Deus por escutar minhas orações e por ter colocado seres tão especiais na minha vida. A realização desse sonho não seria possível sem apoio, orações e carinho de todos vocês. Essa vitória não é exclusividade minha, é de vocês também.

Resumo

O acelerado aumento da geração de resíduos eletroeletrônicos (REEE) pode estar atrelado com o consumo e produção cada vez mais elevados dos eletroeletrônicos. Além de possuírem algumas substâncias potencialmente perigosas na sua constituição, existe muito interesse na recuperação dos elementos valiosos presentes nos REEE. Por esse motivo e por atendimento às exigências legais, os responsáveis pelo setor de eletroeletrônicos têm desenvolvido e implementado sistemas de logística reversa de REEE. A demanda por estudos que analisem a viabilidade desses sistemas tornou-se proeminente nos últimos anos em razão de auxiliarem na sua otimização, dando suporte às tomadas de decisão. O presente estudo analisou a viabilidade da implantação de unidades de pré-tratamento de REEE no município de São José dos Campos/SP a partir da análise do grau de desmontagem para os REEE. A coleta de dados foi importante para o levantamento da atual situação de destinação e gestão dos REEE no município e no Brasil, já que são informações escassas. A criação das alternativas utilizou a ferramenta StEP que apresenta seus resultados em três níveis de desmontagem (A – nível básico; B – nível intermediários; e C – nível avançado). A aplicação do método multicritério ELECTRE TRI teve o intuito de auxiliar os tomadores de decisão na categorização das alternativas viáveis em três categorias (A – mais viável, B – intermediária; e C – menos viável). No geral, os cenários mais viáveis são referentes ao nível de desmontagem B, indicando que uma desmontagem intermediária é melhor quando comparada aos níveis de desmontagem superficiais (A) ou extremamente detalhados (C). Quanto às categorias, as alternativas que possuem pelo menos duas unidades de pré-tratamento se mostraram melhor categorizadas, inclusive durante as análises de sensibilidade.

Palavras-chave: REEE, lixo eletrônico, viabilidade, logística reversa, multicritério, ELECTRE TRI.

Abstract

The accelerated increase in the generation of electronic waste (WEEE) may be linked to the increasingly high consumption and production of electronics. In addition to having some potentially hazardous substances in their constitution, there is a lot of interest in recovering the valuable elements present in WEEE. For this reason and in compliance with legal requirements, those responsible for the electronics sector have developed and implemented WEEE reverse logistics systems. The demand for studies that analyze the feasibility of skill systems has become prominent in recent years due to the support they provide to decision makers. This study analyzed the feasibility of implementing WEEE pre-treatment units in the city of São José dos Campos/SP. Data collection was important for surveying the current situation of WEEE disposal and management in the municipality and in Brazil, since this information is scarce. The creation of alternatives uses a StEP tool that presents its results in three levels of dismantling (A - basic level; B - intermediate level; and C - advanced level). The application of the ELECTRE TRI multi-criteria method was intended to assist decision makers in categorizing viable alternatives into three categories (A - more viable, B - intermediate; and C - less viable). In general, the most viable scenarios are for the B disassembling level, indicating that an intermediate disassembling is best compared to superficial (A) or extremely detailed (C) disassembling levels. As for the categories, as alternatives that have at least two pre-treatment units if better categorized, including during sensitivity analyses.

Keywords: WEEE, electronic waste, feasibility, reverse logistics, multicriteria, ELECTRE TRI.

Índice de Figuras

Figure 1. Methods structure.....	11
Figure 2. General flow of the process mapped in the tool.....	13
Figura 3: Estrutura da metodologia.	33

Índice de Tabelas

Table 1: Simulated alternatives for analysing the feasibility of implementing WEEE cooperatives in São José dos Campos.	15
Table 2: Comparison of the 20 best alternatives ranking for the Operating Results.....	18
Table 3: Comparison of other studies that used the StEP tool.	211
Tabela 4: Estudos sobre viabilidade de logística reversa para REEE.	277
Tabela 5: Estudos que aplicam MCDA para gestão de RSU e REEE.....	30
Tabela 6: Alternativas para análise de viabilidade de implantação de unidades de pré-tratamento de REEE em São José dos Campos.....	36
Tabela 7: Categorias geradas pelo ELECTRE TRI para os procedimentos pessimista e otimista.	41
Tabela 8: Alternativas selecionadas para as análises de sensibilidade.....	41
Tabela 9: Categorização pessimista das alternativas para o Teste 4 e as análises de sensibilidade.	43

Sumário

RESUMO.....	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE DE FIGURAS	III
ÍNDICE DE TABELAS.....	IV
SUMÁRIO	V
1 APRESENTAÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	2
2.1 OBJETIVO GERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
3 METODOLOGIA GERAL.....	3
4 PRIMEIRO ARTIGO	4
4.1. INTRODUCTION.....	5
4.1.1. <i>Brief history of waste pickers and cooperatives in Brazil</i>	5
4.1.2. <i>Formal and informal sectors in Brazilian waste management and generation</i>	6
4.1.3. <i>BPWS and the WEEE Sectoral Agreement</i>	7
4.1.4. <i>Existing studies on feasibility of RL Systems and WEEE cooperatives in Brazil</i>	8
4.2. MATERIALS AND METHODS.....	11
4.2.1. <i>Background knowledge</i>	11
4.2.2. <i>Use of the StEP tool</i>	12
4.2.3. <i>Data collection</i>	13
4.2.4. <i>Data analysis</i>	14
4.3. RESULTS AND DISCUSSION.....	16
4.4. CONCLUSIONS	21
5 SEGUNDO ARTIGO	23
5.1 INTRODUÇÃO	23
5.1.1 <i>Resíduos Eletroeletrônicos</i>	24
5.1.2 <i>A Logística Reversa de REEE no Brasil</i>	25
5.1.3 <i>Viabilidade de sistemas de logística reversa</i>	26

5.1.4	<i>Métodos multicritério</i>	29
5.1.5	<i>ELECTRE TRI</i>	30
5.2	MATERIAIS E MÉTODO	33
5.2.1	<i>Revisão da literatura</i>	34
5.2.2	<i>Estruturação do modelo</i>	34
5.2.3	<i>Elaboração das alternativas e definição dos critérios de avaliação</i>	36
5.2.4	<i>Aplicação do ELECTRE TRI</i>	37
5.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.4	CONCLUSÃO	46
6	REFERÊNCIAS	48
7	APÊNDICES	58

1 APRESENTAÇÃO

O Brasil é o segundo maior gerador de REEE na América, com uma geração de 2143kt em 2019 (FORTI et al., 2020). O aumento na geração desses resíduos é alarmante para a gestão de resíduos no mundo (ISMAIL; HANAFIAH, 2020). Os REEE possuem componentes de grande interesse econômico, mas também substâncias com alta periculosidade para a saúde humana e meio ambiente (MOI et al., 2012).

Em 2019, o Brasil assinou um Acordo Setorial formalizando a logística reversa de REEE no país (MMA, 2020). Esse Acordo reforça a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que é a principal diretriz da legislação brasileira para gestão integrada e gerenciamento de resíduos sólidos no Brasil, incluindo os REEE, além de estimular a parceria dos envolvidos em toda cadeia de resíduos, desde a retirada de matéria-prima para criação de um produto até sua destinação final (BRASIL, 2010).

O Acordo Setorial teve seu impacto minimizado em razão do Decreto 10.240, estabelecendo normas para a implantação da logística reversa dos REEE (BRASIL, 2020). Também cabe menção às instruções normativas do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) IN24/2019 e IN 8/2021 que auxiliaram no entendimento quanto ao transporte desses resíduos, não os considerando como produtos perigosos.

Ainda são poucos os dados e estudos referentes aos REEE no Brasil. A busca por informações que auxiliem os tomadores de decisão no seu dia a dia tem ganhando grande visibilidade e interesse, principalmente quando relacionados a viabilidade econômica da implantação desses sistemas quanto aos processos de pré-tratamento dos REEE.

Assim, a estrutura dessa dissertação ocorre na forma de dois artigos. O primeiro artigo é referente a análise de viabilidade da inclusão das cooperativas na etapa de pré-tratamento dos REEE para o município de São José dos Campos/SP. O segundo apresenta a mesma análise para criação de unidades de pré-tratamento tanto para cooperativas quanto para empresas, utilizando o método ELECTRE-TRI para categorização dos cenários criados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade de implantação de unidades de pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos (REEE), tendo como objeto de estudo a cidade de São José dos Campos/SP.

2.2 Objetivos Específicos

Neste estudo pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Compreender o funcionamento da logística reversa de resíduos eletroeletrônicos no Brasil e no município de São José dos Campos;
- Desenvolver diferentes cenários de logística reversa de resíduos eletroeletrônicos para o município de São José dos Campos;
- Avaliar a viabilidade da etapa de pré-tratamento dos cenários propostos, considerando critérios econômicos e sociais;
- Analisar fatores críticos e elaborar proposta com os cenários mais viáveis para servir como auxílio para tomadores de decisão.

3 METODOLOGIA GERAL

O presente trabalho analisou a viabilidade da implantação de unidades de pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos para o município de São José dos Campos/SP. A primeira parte da pesquisa permitiu o levantamento de dados importantes que possibilitaram entender o funcionamento da logística reversa no Brasil, principalmente relacionado ao envolvimento de cooperativas de catadores. Além disso, a ferramenta StEP permitiu a criação de diversos cenários (alternativas) para análise dessa viabilidade e também realizar algumas análises de sensibilidade.

Como a proposta apresentada envolvia mais de um critério, aplicar um método multicritério como ELECTRE TRI traria mais robustez para o trabalho e auxiliaria na tomada de decisão quanto aos cenários mais viáveis para implantação. Ainda, os autores analisaram situação com negócios voltados para cooperativas, como realizado na primeira parte, mas também para empresas, proporcionando a criação e análise de mais cenários.

4 PRIMEIRO ARTIGO

Revista: Engenharia Sanitária e Ambiental

Submetido em: 22 de Janeiro de 2022

Título: Economic feasibility of e-waste cooperatives in Brazil: a case study of Sao Jose dos Campos

Ingrid Jale da Silva Sales¹, Ricardo Gabbay de Souza² and Pedro Lopes Lucas de Amorim^{1*} (SALES, SOUZA e AMORIM, 2021)

¹ Faculty of Engineering, São Paulo State University (Unesp); Avenida Dr. Alberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá 12516-410, Brazil; ingrid.jale@gmail.com

² Institute of Science and Technology, São Paulo State University (Unesp); Rodovia Presidente Dutra, Km 137.8, São José dos Campos 12247-004, Brazil;

ricardo.souza@unesp.br

* pllamorim@hotmail.com

Abstract: The inclusion of waste pickers' cooperatives in reverse logistics systems is a potential solution for their enhancement, but still faces challenges in Brazil. This study evaluates the economic feasibility of implementing cooperatives for the pre-treatment of waste electrical and electronic equipment (WEEE) in São José dos Campos (state of São Paulo). A StEP Initiative's tool was used to model and evaluate the WEEE's pre-treatment alternatives for its municipality. Furthermore, sensitivity tests simulated competition with the informal sector and other actors. Among the levels analysed for WEEE dismantling, the intermediate level (Level B) had the best feasibility. For other parameters analysed, the performance varied with the amount of waste processed in each cooperative. Sensitivity tests showed that the alternatives presented have a potentially positive annual financial balance, despite the initial implementation costs, thereby demonstrating their economic feasibility.

Keywords: WEEE, e-waste, cooperatives, take-back systems, reverse logistics, economic feasibility.

4.1. INTRODUCTION

In Brazil, cooperatives or associations of waste pickers are formed with the aim of guaranteeing benefits and partnerships to value their labour (FERREIRA; GONÇALVES-DIAS; VALLIN, 2019). The Brazilian Policy on Solid Waste (BPSW, Law 12.305/2010) is the main Brazilian legislation for the integrated management of solid waste in Brazil. This law encourages and prioritises funding to municipalities that work in partnership with these cooperatives, and encourages their participation in reverse logistics (RL) arrangements such as for waste electrical and electronic equipment (WEEE) (BRASIL, 2010). The Brazilian WEEE RL system was formalised in 2019 by a sectoral agreement (a contract between the government and manufacturers, importers, or traders of electrical and electronic equipment (EEE), which recognises the importance of waste pickers' cooperatives in WEEE scenario (SINIR, 2019).

This study aims to evaluate the economic feasibility of implementing WEEE cooperatives in the city of São José dos Campos, São Paulo, Brazil, working in the pre-treatment stage of reverse logistics. Several possible alternatives for the implementation of this system in the São José dos Campos municipality were analysed, identifying those that presented the most advantageous economic performance.

4.1.1. Brief history of waste pickers and cooperatives in Brazil

Since the beginning of the 20th century, there are records that paper was being recycled and that there were scrap-buyers, mainly purchasing bottles and ferrous materials, in the neighbourhood of Brás, in the city of São Paulo. These professionals lost popularity and gave rise to waste pickers that collect all kind of recyclable materials at no cost. Consumption behaviour boosted the amount of waste generated in cities. The high unemployment levels, caused by lack of professional training, made the access to labour market difficult to vulnerable parts of the population. The combination of a lack of job opportunities and an increase in waste generation resulted in the rise of waste pickers working on the streets (FERREIRA; GONÇALVES-DIAS; VALLIN, 2019; PINHEL, 2013). Waste pickers play an important role in municipal waste management; since 2002, their occupation has been formally recognised in Brazil (CBO 519205) by the Ministry of Labour and Employment (MNCR, 2014; MTE, 2002).

To ensure the proper valorisation of their work, groups of waste pickers have organised themselves into cooperatives or associations. The difference between cooperatives and associations is their nature — associations have a greater welfare bias, do not share profits, and allow for simpler management, while cooperatives may share their profits, allow member ownership of assets, and have a greater focus on developing a structured system for waste pickers that enable a business model (CATAFORTE, 2015; PINHEL, 2013). In Brazil, approximately 800 thousand people survive on waste collection and management, of which approximately 70% are women; more than 46 thousand workers are organized (MNCR, 2020; OLIVEIRA, 2020) into 1.677 cooperatives and associations in 2020 (BRASIL, 2021).

According to the Brazilian Cooperatives Law (No. 5.764/1971), these business models not subject to bankruptcy. Formalisation facilitates partnerships with public institutions and the private sector, providing support such as facilities and access to recyclables from municipal solid waste (MSW), allowing for the elimination of middlemen from the waste market and thus achieving prices that are better and fairer (ABES, 2018).

4.1.2. Formal and informal sectors in Brazilian waste management and generation

The processing of MSW in Brazil takes place in two ways, i.e., through the formal and informal sectors (FERRI; DINIZ CHAVES; RIBEIRO, 2015). The formal chain involving the collection of separate recyclables is carried out by municipalities, licensed companies, scrap dealers, cooperatives, and associations of waste pickers (CAMPOS, 2014). In Brazil, each city has autonomous responsibility to manage their MSW, yet only 56,6% of Brazilian municipalities implement the separate collection of recyclables (ABRELPE, 2020). This collection is carried out in 39% of cities by municipalities, in 36% by private companies, and in 50% of Brazilian cities by cooperatives, usually working in mutual partnerships (CEMPRE, 2019a). In the 2018, 30.7% of all waste in municipalities with recyclables collection was collected and processed by formalised waste pickers (i.e., cooperatives), followed by 47.7% of waste being collected by private companies hired by the municipalities, and the remainder being collected by the municipalities themselves (BRASIL, 2019).

As well as the MSW, the informal sector is a fundamental agent in WEEE collection in developing countries and is represented by individual scavengers, cooperatives, scrap dealers, and irresponsible companies (AZEVEDO et al., 2017). Many use harmful practices

in the separation of valuable components from these wastes, disposing of materials with lower monetary value in dumps, green areas, or vacant lots (SOUZA, 2020). A strong effort is needed to recognise these issues and to encourage environmentally appropriate waste management activities (GUTBERLET, 2015). A formal e-waste RL was established only in 2019 through the WEEE Sectoral Agreement (presented in the sections 4.1.3).

The global e-waste generated in 2019 was 53,6 Mt. In the same year, Brazil generated 2.143kt of WEEE (FORTI et al., 2020). In the municipality of São José dos Campos, a study from 2017 (ABBONDANZA; SOUZA, 2019) estimated the generation of 2,800 tons of WEEE (average of approximately 4 kg/capita).year), which forms the basis of this study. In 2018, 67 thousand tons of recyclable waste was collected by cooperatives and associations of waste pickers (ABRELPE, 2019) in Brazil, of which 145 tons consisted of WEEE. Despite the existence of formal RL, several studies indicate the presence of WEEE in landfills (CEMPRE, 2019b; FORTI et al., 2020).

4.1.3. BPWS and the WEEE Sectoral Agreement

The BPWS policy encourages the inclusion of cooperatives and other forms of waste pickers' associations that are represented by low-income individuals. It also establishes the obligation of manufacturing companies, importers, distributors, and traders in “structuring and implementing RL systems, upon return of products after use by the consumer” (BRASIL, 2010), as outlined within the policy document. These products include pesticides, cells and batteries, tires, lubricating oils, light bulbs, and electronic products (BRASIL, 2010). RL can generate both economic and social benefits, as it represents a great opportunity for job generation and the development of new businesses (JAUNICH et al., 2020; SAHAJWALLA; HOSSAIN, 2020).

RL is characterised by a set of actions, procedures, and avenues that enable the “collection and return of solid waste to the business sector for reuse, in its cycle or in other production cycles, or other environmentally appropriate final destination” (BRASIL, 2010), as outlined within the BPWS. These systems can take place through regulation or sectorial agreements, or through terms of commitment signed between the government and the business sector (BRASIL, 2010).

In 2019, representatives of the EEE sector and the federal government signed a sectoral agreement, i.e., a contract between the government and manufacturers, importers,

or traders; its purpose is to implement a formal RL system for home appliance products and their components. Following the BPWS, the EEE companies formed a managerial entity (Green Eletron), which represents their interests as a legal entity in order to “structure, implement and operate the RL system” (BRASIL, 2020; MMA, 2020).

In the sectoral agreement, signatories made a proposal for the functioning of the system, which gave consumers two ways to dispose of their WEEE — drop-off or door-to-door collection. Drop-off points can be located within retail stores themselves or at fixed points, similar to voluntary delivery points (VDPs) where people can dispose of various types of waste in limited amounts. The agreement proposed the continuation of itinerant reception points, which are very common in specific, temporary campaigns. The sectoral agreement recognizes the fundamental role of cooperatives and associations of recyclable material collectors. It encourages their participation as long as they are qualified in the RL system as service providers (BRASIL, 2020).

The system operates by receiving and temporarily storing WEEE for transport, followed by its sorting, pre-treatment, and subsequent environmentally sound disposal (BRASIL, 2020; MMA, 2019; SINIR, 2019). Since WEEE may be considered hazardous waste, Brazilian legislation have defined that this classification should only occur when the waste is inadequately managed and damaged, or when its potentially hazardous components are separated after dismantling (e.g., ink cartridges, toners, cells, batteries, and CR tubes), leading to human exposure to possible hazardous substances (BRASIL, 2020; CETESB, 2016).

WEEE pre-treatment consists of the dismantling and separation of appliances and their components, depending on the type and design of each piece of equipment. It considers which destination each specific part goes to, such as for reuse, recycling, or final disposal (BACHÉR; MROTZEK; WAHLSTRÖM, 2015). The optimisation of this process is extremely important for the RL system as a whole, in addition to being the main stage of cooperatives’ action within RL (SMA, 2012).

4.1.4. Existing studies on feasibility of RL Systems and WEEE cooperatives in Brazil

Studies on the RL of WEEE across the world have been increasing, usually aimed at optimising transport routes (ACHILLAS et al., 2010, 2012), dismantling processes (DUFLOU et al., 2008) and the locations of WEEE treatment and recycling units

(NOWAKOWSKI; KRÓL; MRÓWCZYŃSKA, 2017). Some have supported the identification of various criteria and the prioritisation of requirements for precious metal extraction plants (CHAUDHARY; VRAT, 2017), or even units for complete RL systems (AGRAWAL; SINGH; MURTAZA, 2016). Some have also assisted in the development of strategic analyses for structuring WEEE RL in Brazil indicating benefits as strategic, environmental, economic and social, for example, income generation, formalization of jobs, environmental protection and others (GUARNIERI; SILVA; LEVINO, 2016).

In general, costs are important quantitative economic data, but qualitative factors are equally important for the design and analysis of RL, such as the environmental and social aspects. Some criteria adopted in studies include population served, maps of the quantity and distances between collection points, proximity of collection points to recyclers, economic potential, employment and income generation, and environmental impacts (OTTONI; DIAS; XAVIER, 2020; SHOKOUHYAR; AALIREZAEI, 2017; SOUZA et al., 2015). In some cities, such as Dar es Salaam in Tanzania (UNIDO, 2012), Kampala in Uganda (UNIDO, 2014), Phnom Penh in Cambodia, Rio de Janeiro in Brazil (SPITZBART, 2016) and Cairo in Egypt (MOSTAFA; SARHAN, 2018), studies assessed the feasibility of WEEE pre-treatment alternatives using the StEP (Solving the E-waste Problem) initiative tool—a business plan calculation tool for manual dismantling facilities. Among these studies, Kampala was the only city that did not present economic feasibility for the implementation of WEEE dismantling units. All remaining studies raised important points, such as the need for governmental support to encourage public policies and raise awareness about the disposal of WEEE to boost this market, in addition to evaluating the feasibility of implementation alternatives.

A study carried out in Opole, Poland (NOWAKOWSKI; KRÓL; MRÓWCZYŃSKA, 2017) proposed a low-cost model for collecting WEEE through a multi-criteria approach using fuzzy logic. Their results showed an optimisation of the costs and resources necessary for the collection of WEEE in the city using vehicle routes, which can also be successfully applied in large cities. The optimisation includes operational costs, efficient use of vehicles, efficient waste loading and resident's satisfaction.

In Italy, a study (ELIA; GNONI; TORNESE, 2019) adopted a simulation-based methodology to compare different alternatives for the WEEE collection service, in order to assess the sustainability of this service. Their results showed that a transport system with a

wide variety of destination routes combined with electric vehicles is an interesting and useful economic and environmental proposal.

Valente et al. (2021) analysed the integration of WEEE collection with current recyclable collection systems in a Brazilian municipality. They identified that this inclusion is attractive when cooperatives are supported by the government and scrap dealers (the last assisting as an inventory partner in waste storage for large sales). They pointed out the difficulties cooperatives and associations face while signing agreements with large WEEE generators and recycling industries, in addition to the distances between cooperatives and recycling industries. This study did not use the StEP tool, but proposed a methodology for analysing the economic feasibility of WEEE RL. The authors evaluated different alternatives for three cooperatives and concluded that the inclusion of cooperatives in the separate collection of WEEE is economically attractive. When the cooperatives receive support from both scrap dealers and the government, there is a gain of 65% (USD 1,427.19/month/per cooperative). When scrap dealers and the government only pay transport costs, the economic gain is 36% (USD 795.87/month/per cooperative). If the cooperatives also pay the treatment cost, this gain falls to 33% (USD 737.40/month/per cooperative). In the worst-case, if cooperatives also pay the vehicle costs for the collection and distribution, the estimated gain is 5% (USD 106.08/month/per cooperative).

Focusing WEEE cooperatives in Brazil, Oliveira et al. (2012) presented the different types of WEEE management systems in the world, compared to the current Brazilian alternative. They concluded there is little information available regarding WEEE, and that the integration of all sectors, from the private sector to the informal sector, can boost WEEE management.

Ghisolfi et al. (2017) measured the impact of legal incentives on the formalization of waste pickers. They emphasized the importance of guaranteeing support to cooperatives so that they can fairly compete with private companies in this sector. The study by Ferreira, Gonçalves-Dias, and Vallin (2019) examined the inclusion of waste pickers in the RL of electronic waste; the researchers observed a major access barrier for cooperatives participating in sectorial and market agreements, as well as the difficulty of including waste pickers in these actions. This obstacle mainly exists because of the economic interests in this sector. The authors also noted distrust in the work of cooperatives in this stream, favouring private companies over them.

Oliveira et al. (2020) carried out a characterisation of the WEEE received in cooperatives in Recife, Brazil. They identified that the most common WEEE were computers, cathode ray tubes (CRTs), and household appliances. However, mobile phones were not commonly found during the survey period. The researchers attribute this fact mainly to the exchange and sale of obsolete devices for second-hand use, which is a common practice in Brazil. Gouveia et al. (2019) evaluated occupational exposure to mercury in recycling cooperatives within the metropolitan region of São Paulo. Their results indicated that the workers were not exposed to mercury within their region of study.

4.2. MATERIALS AND METHODS

This study was structured in three main stages— background knowledge, data survey, and data analysis and discussion (Figure 1).

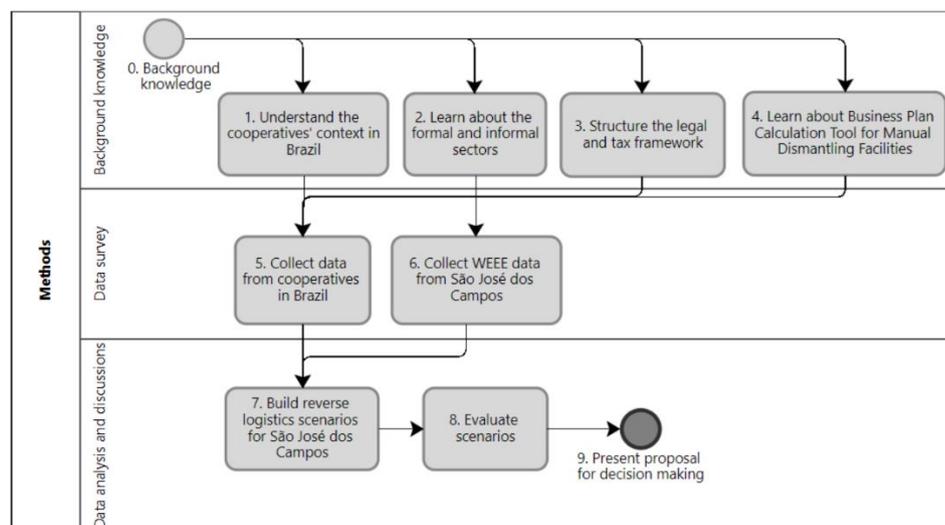


Figure 1. Methods structure.

4.2.1. Background knowledge

The first step of this study was to understand the participation and functioning of waste management cooperatives and associations in Brazil, with further efforts directed specifically to WEEE cooperatives. The StEP Initiative provides abundant information on WEEE management, worldwide.

To survey the most relevant publications on the subject, this study used the Google search tool and the scientific databases Scopus and Web of Science (WOS) (as of September

2020). These databases allowed for the identification of scientific studies published on WEEE cooperatives in Brazil, by using the following key terms: (“WEEE”, “waste electrical and electronic equipment”, or “e-waste”) with the connective AND for cooperatives’ studies (“cooperative”, “recycl*”, “pre-treatment”, “dismantling” or “take-back”) AND “Brazil”. Studies on the feasibility of implementing WEEE RL systems were identified using the terms: (“WEEE”, “waste electrical and electronic equipment”, or “e-waste”) AND (“takeback”, “take-back”, “reverse logistics”, “pre-treatment”, or, “dismantling”) AND (“feasibility”, “econom*”, “social”, “costs”, or “investment”).

4.2.2. Use of the StEP tool

This study used the Business Plan Calculation Tool for Manual Dismantling Facilities, developed by the StEP Initiative, to model and evaluate potential costs and revenue for WEEE pre-treatment alternatives. Its main objective is to help entrepreneurs who wish to implement economically and environmentally feasible WEEE pre-treatment plants. It can also be helpful to decision-makers for understanding the economic conditions of WEEE takeback in their area of influence, since the results provide guidelines for planning WEEE dismantling units. With this information, it is possible to estimate the output fractions produced and the annual work time required for this production, the resources (i.e., staff, space, infrastructure, and equipment) required to implement the unit, and the achievable revenues by selling recyclable fractions (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016).

This tool can be applied to any currency if the same unit is used in all currency data entry fields. This study uses de Brazilian currency “Real or R\$”. Results were generated for three distinct dismantling levels: Level A (basic) considered only the removal of the hazardous (e.g., batteries, toners, and CRT tubes) and most valuable components (e.g., printed circuit boards (PCBs), which are destined to mechanical separation/recycling. Level B (intermediate) prioritises the manual dismantling of components, considering a reasonable effort in order to obtain relatively pure materials (e.g., plates, cables, plastic casings, metal scrap, drivers, etc.), while sending as many components as possible to recycling. Level C (advanced) considers that manual dismantling must take place until it is not possible to further separate any pure materials without mechanical fragmentation (e.g., cleaning of PCBs, dismantling of drivers, separation of the CRT glasses (front and funnel), and the

mechanical separation of copper from cables/wires) (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016).

An Excel spreadsheet was used to apply this tool. Its general structure consists of entering general data, such as salaries, working hours, costs, definition of flows, additional provision, and prices. Using this, it is possible to calculate a business plan with a return on investment within five years. Figure 2 shows the general flow of the process mapped using the StEP tool (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016).

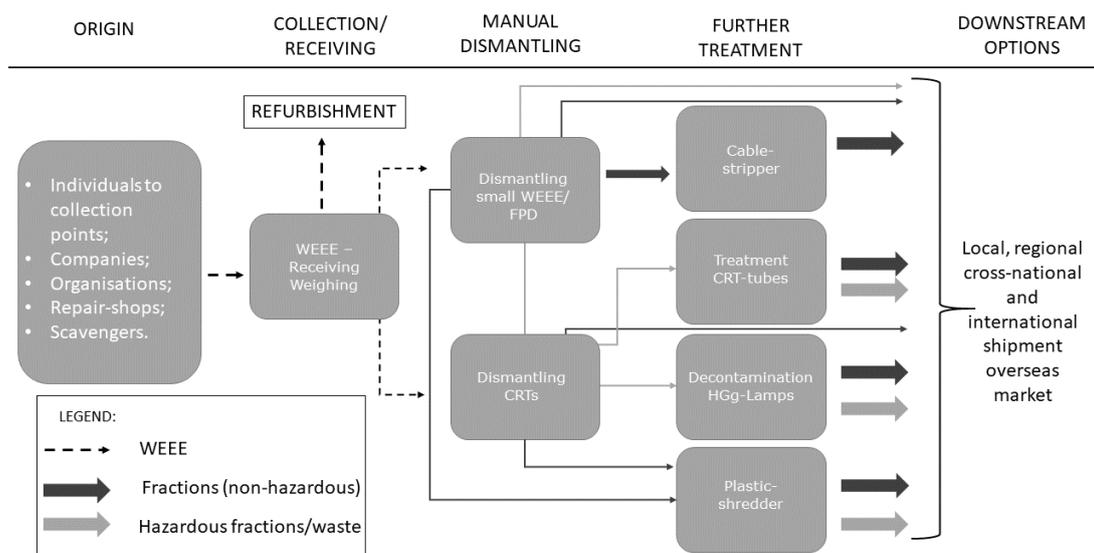


Figure 2. General flow of the process mapped in the tool.
Adapted from (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016).

4.2.3. Data collection

The scope of this article is the municipality of São José dos Campos, located in the state of São Paulo, with a focus on the implementation of WEEE pre-treatment cooperatives. The Appendix A presents the data needed to create the aforementioned spreadsheet, referring to the generation and composition of WEEE in that municipality, work carried out by Abbondanza and Souza (2019) was used.

The Business Plan Calculation Tool for Manual Dismantling Facilities (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016) was used to carry out a detailed survey of data, such as the composition of WEEE, generation, price, and expenses with transport/employees/taxation.

Parameters such as areas (in m²) for each sector of the units and EEE lifespan maintained the original standards suggested by the StEP Tool. For the WEEE market costs and prices in the municipality, data were collected through interviews with five WEEE companies serving São José dos Campos, from August to November 2020 (here identified as Companies 1, 2, 3, 4, and 5, for confidentiality). The models adopted the best market values found during this survey (see Appendix B).

The distances for transporting these materials from São José dos Campos to WEEE purchasing companies were provided by Company 3 and by a local WEEE management cooperative (Coopertech). The subsequent calculations considered a heavy truck-type vehicle with a capacity of 10 to 14 tons using data from Coelho (2010) with an output of 2.5 km per litre of diesel fuel (DEVA, 2016), at a cost of R\$3.62 /litre at local gas stations in November 2020 (or USD 0.64, at R\$5.62/USD1 in 4/18/2021). The distance travelled to sell WEEE material was categorised into local (0-5km in São José dos Campos), regional (5–500 km to Sorocaba), and long distances (over 500 km to Paraná). These cities represent important points in the electronic waste market of the region, as informed by Coopertech. Tolls cost was also considered, using data from the Mapeia website (<https://www.mapeia.com.br/>) in November 2020 (see Appendix C).

Coopertech also provided information on the average income of cooperative's workers (see Appendix D), taxes, and maintenance expenses (see Appendix E). They facilitated the understanding of the current scenario as well as the management of such waste within a municipality. In Coopertech's current organisational scenario, the salaries are equivalent to a Brazilian minimum wage (as of in November 2020), which is the same for all members.

This study collected the rest of the market value data through internet searches on 11/2020, such as equipment prices (see Appendix F), rental and sale of properties (see Appendix G), considering a property of 750 m² in an industrial district of the city.

The tax rates vary greatly depending on the type of activity chosen by the cooperative relating to taxes directly applied to the sale of materials. An accumulated rate of 23%, as provided by Coopertech, was considered, which is close to the values (see Appendix H), found in the literature (CATAFORTE, 2015; FUNDAÇÃO AVINA ET AL., 2013).

4.2.4. Data analysis

Table 1 presents the simulated alternatives for the feasibility of implementing WEEE cooperatives in the municipality of São José dos Campos. A total of 34 alternatives was analysed, which enabled the interpretation of the results and discussion of the most viable alternatives.

Table 1: Simulated alternatives for analysing the feasibility of implementing WEEE cooperatives in São José dos Campos.

ALTERNATIVES	Number of cooperatives in the city	Percentage of delivery at cooperative	Property contract	Type of waste received
1	1	0%	Rented	All
2	1	10%	Rented	All
3	1	20%	Rented	All
4	1	30%	Rented	All
5	1	50%	Rented	All
6	1	100%	Rented	All
7	1	0%	Rented	CRT only
8	1	0%	Rented	Mobiles only
9	1	0%	Rented	Computers only
10	1	0%	Rented	All, except CRT
11	1	0%	Rented	All, except mobiles
12	1	0%	Rented	All, except computers
13	2	0%	Rented	All
14	3	0%	Rented	All
15	4	0%	Rented	All
16	5	0%	Rented	All
17	6	0%	Rented	All
18	1	0%	Purchased	All
19	1	10%	Purchased	All
20	1	20%	Purchased	All
21	1	30%	Purchased	All
22	1	50%	Purchased	All
23	1	100%	Purchased	All
24	1	0%	Purchased	CRT only
25	1	0%	Purchased	Mobiles only
26	1	0%	Purchased	Computers only
27	1	0%	Purchased	All, except CRT
28	1	0%	Purchased	All, except mobiles
29	1	0%	Purchased	All, except computers
30	2	0%	Purchased	All
31	3	0%	Purchased	All
32	4	0%	Purchased	All
33	5	0%	Purchased	All
34	6	0%	Purchased	All

Alternatives that receive only one type of WEEE, or all WEEEs except a particular one, are complementary, and their results were combined for a single final alternative (e.g., 7 and 10; 8 and 11; 9 and 12; 24 and 27; 25 and 28; 26 and 29). For example, there were

alternatives with two dismantling units in the city, one of them receiving only CRT, and the other receiving all WEEEs except CRT. All alternatives with more than one cooperative are complementary, maintaining the same total amount of processed WEEE.

This study considered that 100% of the estimated WEEE generated by the 700.000 inhabitants (ABBONDANZA; SOUZA, 2019) would be processed in cooperatives (1st analysis). For a further sensitivity analysis, this study performed two tests with the alternatives listed in Table 1, representing the competition with the informal sector and other RL systems. The first sensitivity analysis considered that only 50% of the total amount of WEEE generated in the municipality would be processed by the cooperatives. The second sensitivity analysis reduced the percentage of cell phones and notebooks from the WEEE mix by 50%.

In order to assess these alternatives, this study considered the operating result (i.e., annual budget balance: revenue - expenses) as the most representative criterion for decision-making. It also evaluated criteria such as investment costs (in R\$, with a payback time of 5 years), area needed for the units (total in m²), total number of staff needed, and staff costs.

4.3. RESULTS AND DISCUSSION

Collecting data on WEEE is of great relevance to the waste management sector and for the wider academic community. This is because there is lack of adequate information (OTTONI; DIAS; XAVIER, 2020), especially when it comes to the inclusion of cooperatives in waste management systems. All collected data and the final results are in the Appendices A-H and supplementary material. These data can support other studies on this subject.

For each alternative, there are three levels of WEEE processing (i.e., A, B, and C). For the number of workers in the first analysis, the levels of dismantling influenced the result, varying between 8 and 48 workers, generally alternating amongst levels A, B, and C. In the highest levels of WEEE dismantling (e.g. level C), greater numbers of workers are needed and the associated staff costs are higher as well (R\$ 61,696 to R\$ 740,364, or USD 10,978 to USD 131,737/year). The total area required for the units ranged between 2,163 and 4,638 m², indicating that the advanced separation of WEEE results in a larger working area when compared to the lower level of processing (i.e., Level A).

All alternatives resulted in positive operating results — R\$/y, or annual balance of income and expenses. In general, Dismantling Level B (intermediate) presented higher balances compared to the other levels. All 20 of the best operating results refer to Level B, varying between R\$ 2,804,568 and R\$ 3,070,057 (USD 499,033 and USD 546,273/y). The alternatives with operating results greater than 3 million Reais, from the highest to the lowest, are: 6, 5, 4, 3, 2, 1 (see Table 1), all of which are alternatives with the rental type of property. Investment costs are approximately 67 times higher for these properties when compared to rented locations, as the purchase of a property requires a large initial investment, while rentals have costs diluted over time.

The first sensitivity analysis considered that cooperatives would process only 50% of the total amount of WEEE generated by the population of São José dos Campos. In this analysis, the alternatives also resulted in positive operating result balances (R\$/y). This depicts a competitive alternative in which formal RL with cooperatives do not exclusively receive all municipal WEEE, thus considering other intermediaries and competitors in the market. The analysis shows that this can be a profitable activity, with 50% of the total WEEE being processed by cooperatives.

All of the 20 largest operating results in this sensitivity test still refer to dismantling level B; however, the values are halved, approximately ranging from R\$ 1,222,028.00 to R\$ 1,492,263.00 (USD 217,443 to USD 265,527). The top six alternatives are 6, 5, 4, 3, 2, and 1, similar to the first analysis. Investment costs are nearly 60 times higher for purchased properties than the costs for leased locations. While buying real estate, the StEP tool predicts an investment payback time of five years. However, rented alternatives become more interesting; it is important to consider the decision-makers' expectations regarding the return on their investment. Dismantling units can be rented out in the short term, with little investment, while it may be better to buy properties in the medium or long term. Legal incentives should ensure the effective inclusion of cooperatives improving bargaining power through the provision of infrastructure and equipment (GHISOLFI et al., 2017).

The remaining criteria presented the same influence of dismantling levels discussed in the first analysis results. The number of workers ranged between 6 and 36 workers, and costs were R\$ 92,454 to R\$ 590,271 (USD 16,451 to USD 105,030). The area required was between 762 and 2,814 m². This is in agreement with other studies as Cairo, both show the same density of staff/m² (MOSTAFA; SARHAN, 2018).

The second sensitivity analysis considered a 50% reduction in the receipt of mobile phones, notebooks, and computers by the cooperatives, compared to the first analysis for 100% of WEEE. This analysis also retained the positive operating results. All of the top 20 operating results are still related to Level B. However, operating results reduced by approximately half, compared to the first round, ranging from R\$ 1,782,725 to R\$ 2,051,312 (USD 317,211 to USD 365,002). The six best alternatives are 6, 5, 4, 3, 2, and 1, similar to the first analysis. The investment costs are about 69 times higher for properties purchased than for rented properties, which remains uninteresting. The number of workers and area required were not significantly different from those in the other analyses. As the study in Uganda (UNIDO, 2014), the results should suggest that the gained material value of a advanced dismantling exceeds the costs with more workers. That oppose each other financially.

Table 2 shows the comparison of the results of the first round with the sensitivity analyses, with the classification of the 20 best alternatives according to the operating results criterion.

Table 2: Comparison of the 20 best alternatives ranking for the Operating Result criteria.

Ranking	First analyses	Sensitivity analyses 1	Sensitivity analyses 2
1	C6	C6	C6
2	C5	C5	C5
3	C4	C4	C4
4	C3	C3	C3
5	C2	C2	C2
6	C1	C1	C1
7	C7-10	C23	C23
8	C13	C22	C22
9	C23	C21	C21
10	C22	C20	C20
11	C21	C19	C19
12	C20	C18	C18
13	C19	C7-10	C13
14	C18	C8-11	C7-10
15	C14	C13	C8-11
16	C24-27	C24-27	C30
17	C25-28	C30	C24-27
18	C30	C14	C25-28
19	C15	C15	C14
20	C8-11	C32	C16

Most alternatives have a 0% WEEE delivery rate directly to the cooperative. The rest differ when this percentage is 0%, 10%, 20%, 30%, 50%, and 100%, for 6, 5, 4, 3, 2, and 1, respectively. Thus, C6>C5>C4>C3>C2>C1 follows this sequence because of the percentage

of WEEE delivery in cooperatives. The higher this rate, the lower the transportation costs (C6=100%, C5=50%, C1=0%). The same applies to alternatives C23>C22>C21>C20>C19>C18.

The second sensitivity analysis had the largest impact on the operating result, referring to a 50% reduction in the amount of waste processed in cooperatives. It is possible to notice that the amount of e-waste dismantling in the unit is of great importance for the operating result. In Uganda, the composition of collected WEEE also affects the business performance (UNIDO, 2014). Encouraging the creation of public policies can boost the amount of WEEE collected in the municipality, creating opportunities for partnerships with large WEEE generators, with a strong effort to raise awareness among the population.

However, comparing the set of alternatives with rented property (1, 2, 3, 4, 5, and 6) with those purchased (18, 19, 20, 21, 22, and 23), there was no significant difference between the value of its operating results in the three analyses. The biggest difference is in the investment cost for the purchased properties, since full payment is required in that alternative, indicating that in the short term it is interesting to use places rented or ceded by public incentives. It is noteworthy that other sensitivity tests are needed in this area that vary this parameter, but this was operationally unfeasible in this research due to the need of manual operation of the StEP tool.

Among the alternatives that combine two dismantling units, one exclusively for a type of appliance (e.g., CRT) and one that received all remaining types, the combination of Alternatives 7-10 presented the best results in all analyses but they results have a little variation when compared to others alternatives. This appears in the ranking of the 20 best alternatives. Thus, it is important to have a unit that works exclusively with CRT and another which works with the rest of the waste. However, as pointed out by Souza (2020), the generation of CRT waste peaked during 2015 and 2016 during the exchange of TVs and monitors to modern models (such as LCDs), reducing CRT volume over time. This alternative may thus not be feasible in the long term, not recommended by this study.

Finally, alternatives with more than one dismantling unit do not exhibit significant variations in the operating result. The larger difference is related to investment costs, which continues to be higher for purchased properties. It is important to emphasise that, in these cases, the area needed to install the unit can be an advantage, as it allows for the use of smaller spaces spread throughout the city, instead of a larger unit concentrated in a single place. Having more than one dismantling unit throughout the city is also interesting as costs

such as transport are reduced, and all units can join together to form a network of cooperatives that sell their waste together, valuing the market and its work (VALENTE et al., 2021).

In addition to the work by Valente et al. (2021), the analysed alternatives were based on current information from the WEEE market. A large part of the waste sales prices follows the fluctuation of the dollar. It is important to emphasise that these alternatives can be updated according to the market and its values. This influences the units' operating result, reducing their economic feasibility. Despite this, it's important to assess as a priority for the recovery of critical metals in order to maximize recovery benefits (GRIMES; MAGUIRE, 2020).

Among the dismantling levels analysed, alternatives that showed the best operational results were related to level B, followed by levels C and A. This indicates that the advanced separation of WEEE to obtain finely separated parts is not economically advantageous (i.e., Level C), as for the most basic Level (Level A) and not recommended by this study. UNIDO (2014) points that the more time is invested in each WEEE, the better the separation of materials will be. If the dismantling WEEE is advanced, more dismantling workers will be necessary, resulting in an increase in the cost of staff.

Table 3 presents a comparison of this study with other studies that use the StEP tool to assess the feasibility of pre-treatment systems in several cities around the world. It is possible to notice that the levels of disassembly in alternative B and C present better performance in these studies, which was not different from the results of this study. Of these studies, the only one that obtained a negative operating result was Kampala, showing that it is not an economically viable alternative for that city if it depends exclusively on the intrinsic value of the treated material (UNIDO, 2014). Except for the study conducted in Egypt, studies did not present the details for other criteria. Investment costs showed great divergence in the studied cities, mainly due to the cost of area/m², which is higher in the Egyptian alternative than in the Brazilian alternative (USD 25/m² and USD 2.13/m², respectively). In addition, a greater amount of WEEE (like in Egypt) increases the necessity of staff and area, increasing the costs.

Table 3: Comparison of other studies that used the StEP tool.

City/Country	Kampala/ Uganda (UNIDO, 2014)	Rio de Janeiro/ Brazil (SPITZBART, 2016)	Phnom Penh/ Cambodia (SPITZBART, 2016)	Cairo/ Egypt (MOSTAFA; SARHAN, 2018)	São José dos Campos/ Brazil
Operation Results (USD/y)	-53,000	44,000	118,000	516,365 to 708,659	499,033 to 546,273
Investment Costs (USD)	-	-	-	441,320 to 375,835	13,715 to 15,753
Staff (unit)	-	-	-	86 to 97	19 to 21
Staff Costs (USD/y)	-	-	-	177,282 to 199,899	52,145 to 58,169
Area (m²)	-	-	-	11,905	3,088 to 3,145
WEEE processed (t/y)	1000	-	-	2,500	960
Most feasible level of dismantling	C	B	C	C	B

For a model that processes approximately 137 t/year of WEEE in three cooperatives, the alternative with the best annual economic gain, as presented by Valente et al. (2021), and is around USD 51,378.84/y, with the support of the government and scrap dealers. For this study, the annual gain is USD 546,273 with a processing of 960 t/year of WEEE in a single cooperative in the municipality. The difference of these results to the present study may be linked to market values for the sale of WEEE, which may be different in each region and fluctuate according to the dollar in the period.

Despite the methodological differences from the study by Valente et al. (2021), the alternatives evaluated in this work demonstrate the potential feasibility of WEEE cooperatives, even without receiving financial support from the government. However, encouraging partnerships between WEEE actors during the initial investment can boost the economic growth of cooperatives, as this support can help with the initial costs of installation and acquisition of equipment.

4.4. CONCLUSIONS

This study evaluated the feasibility of WEEE pre-treatment cooperatives in São José dos Campos, a Brazilian city. An important contribution of this study is the collection of market data from the WEEE sector in Brazil; studies referring to this theme remain scarce

in Brazil. Research that addresses the theme of WEEE cooperatives is even more difficult to find, and this study can contribute to the scientific knowledge of these entities.

In this study, most of the evaluation criteria varied according to the amount of waste processed in the cooperatives. A greater amount of waste in each unit means more space is needed for its disassembly and storage, requiring more skilled workers, and thus involving higher total costs. Therefore, the best alternative is the C6, only one unit, receiving 100% of all municipal e-waste in a purchased property.

All alternatives assessed in this study had a positive annual balance (i.e., operational results), demonstrating the potential feasibility of these units to process a minimum of 50% of the WEEE generated in the municipality. Sensitivity tests did not influence this positive economic performance but reduced the balance to half of its original value, without major variations in other criteria, indicating that the amount of dismantling e-waste in the unit influences its feasibility. The alternatives with the highest balances considered an intermediate level (level B) of WEEE dismantling, allowing to recommend this as the most adequate level of dismantling WEEE in São José dos Campos.

Author Contributions: Conceptualisation, methodology, formal analysis, investigation, data curation, writing—original draft preparation, writing—review, and editing is done by Ingrid Jale da Silva Sales; conceptualisation, methodology, writing—review, and supervision is done by Ricardo Gabbay de Souza; data curation, writing—review, and editing is done by Pedro Lopes Lucas de Amorim.

Acknowledgments: The lead author thanks Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), of the Ministry of Education, Brazil. The authors are grateful for the support offered by CooperTech and other companies for providing the data for this project.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

5 SEGUNDO ARTIGO

Submetido para tradução.

Título: Análise multicritério da viabilidade de unidades de pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos em São José dos Campos.

Ingrid Jale da Silva Sales¹, Ricardo Gabbay de Souza² and Pedro Lopes Lucas de Amorim^{1*}

¹ Faculty of Engineering, São Paulo State University (Unesp); Avenida Dr. Alberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá 12516-410, Brazil; ingrid.jale@gmail.com

² Institute of Science and Technology, São Paulo State University (Unesp); Rodovia Presidente Dutra, Km 137.8, São José dos Campos 12247-004, Brazil; ricardo.souza@unesp.br

* pllamorim@hotmail.com

5.1 INTRODUÇÃO

Os equipamentos eletroeletrônicos (EEE) são compostos por peças que necessitam de correntes elétricas ou de campos eletromagnéticos para funcionarem. Quando um EEE atinge o fim da sua vida útil, ele passa a ser chamado de resíduo eletroeletrônico (REEE) (ABDI, 2013; FORTI, 2019). O aumento da geração de REEE tem chamado atenção para a gestão destes resíduos no mundo (ISMAIL; HANAFIAH, 2020). Com uma previsão de geração de quase 75Mt de REEE até 2030 no mundo, o Brasil é segundo maior gerador de REEE na América (FORTI et al., 2020).

Em 2019, o Brasil assinou um Acordo Setorial que consiste em um contrato firmado entre o poder público e fabricantes, importadores, distribuidores ou comerciantes de EEE. Seu intuito é implementar a Logística Reversa (LR) de REEE no país (MMA, 2020). A LR permite planejar um conjunto de ações e procedimentos com o intuito de viabilizar a “coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010). O Decreto 10.240 estabeleceu normas para a implantação da logística reversa dos REEE (BRASIL, 2020).

Como existem poucos dados sobre os REEE no Brasil, estudos nesta área podem contribuir para a melhoria na qualidade de vida das pessoas que manuseiam estes resíduos, e auxiliar na gestão de áreas que são contaminadas por eles. A gestão correta dos REEE pode

impulsionar o mercado através da reciclagem, entre outros benefícios (BALDE et al., 2017). Ainda são poucos os estudos sobre a viabilidade de sistemas de logística reversa no Brasil e no mundo. Esse cenário vem evoluindo e ganhando visibilidade por proporcionar apoio nas tomadas de decisão dos stakeholders.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade de implantação de unidades de pré-tratamento de resíduos eletroeletrônicos, tendo como objeto de estudo a cidade de São José dos Campos/SP, através da simulação, comparação e classificação de cenários.

5.1.1 Resíduos Eletroeletrônicos

Os EEE, assim como grande parte de outros produtos, possuem um ciclo de vida que vai deste a extração da matéria prima até o seu descarte. O final desse ciclo pode ocorrer devido a uma falha no seu funcionamento ou por obsolescência, ou seja, pela existência de um produto mais moderno disponível no mercado. Já a descontinuação ocorre quando uma empresa decide por não produzir mais determinado equipamento e/ou peça, dificultando seu conserto (ABDI, 2013). O REEE é um equipamento ou componente eletroeletrônico que atingiu o fim de sua vida útil, por se esgotarem as possibilidades de conserto ou em função do descarte dado pelo usuário (BABU; PARANDE; BASHA, 2007).

Alguns componentes dos REEE possuem alto valor econômico devido aos recursos presentes, como os metais não-ferrosos, preciosos e terras raras. (AKCIL et al., 2015; ISTRATE et al., 2018; SCHLUEP et al., 2009). É interessante observar a proporcionalidade do valor dos materiais em equipamentos com metais preciosos na sua constituição. Geralmente, apesar destes metais não chegarem a 1% do peso total do equipamento, equivalem a 80% do valor intrínseco do produto (ABRACI, 2010, *apud* XAVIER, 2014). Alguns componentes também possuem substâncias com alta periculosidade para a saúde humana, como metais pesados e Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs), podendo causar danos cerebrais, graves reações alérgicas, alterações genéticas, câncer, problemas pulmonares, acumulação no organismo e outras doenças dependendo da substância a que a pessoa seja exposta (MOI et al., 2012). Esta exposição é piorada em processos informais e inadequados de manejo de REEE, como a desmontagem e reciclagem irregulares, que ocorrem em larga escala em países em desenvolvimento (MOI et al., 2012; SOUZA, 2020).

O crescente volume de REEE é um grande desafio para a gestão de resíduos no mundo. Somente no ano de 2019, cerca de 53,6Mt de REEE foram gerados. Quase 30% desses correspondem aos EEE pequenos, seguidos de 25% de EEE de grande porte, 20% de EEE reguladores de temperatura, e os 25% restantes divididos entre telas, EEE de informática/telecomunicações e lâmpadas. Até 2030, a previsão é de uma geração de 74,7Mt de REEE no mundo (FORTI et al., 2020).

O Brasil é o principal gerador de REEE na América Latina, com 2.143kt em 2019 (FORTI et al., 2020), sendo a cadeia formal responsável pela logística reversa de 514t de REEE no país (ABRELPE, 2020). No município de São José dos Campos, no estado de São Paulo, objeto de estudo do presente projeto, estimou-se uma geração de 2.800t de REEE em 2017, por uma população de aproximadamente 700 mil habitantes (ABBONDANZA; SOUZA, 2019). Um estudo de 2018 identificou que cerca de 72t de REEE são destinadas ao aterro sanitário municipal por ano (URBAM, 2018).

No Brasil, os municípios são responsáveis por gerir seus RSU. Normalmente a cadeia formal da coleta seletiva de recicláveis é executada pela prefeitura, empresa particular (empresa de coleta ou recicladora) e/ou cooperativas e associações de catadores de materiais recicláveis, geralmente trabalhando em parceria (CEMPRE, 2019a). Para os REEE, essa cadeia também é representativa, pois em alguns casos a coleta seletiva e comum de RSU recebe parte desses resíduos. O setor informal é um forte agente na logística reversados REEE nos países em desenvolvimento, incluindo o Brasil. Alguns catadores individuais utilizam práticas perigosas para separação de componentes valiosos destes resíduos, descartando as partes menos nobres e com baixo valor econômico em lixões, áreas verdes e terrenos baldios (SOUZA, 2020; SOUZA et al., 2016). Esses catadores têm seu serviço subvalorizado e se submetem a condições precárias de trabalho. É preciso um trabalho forte para incentivar atividades ambientalmente adequadas, principalmente por parte do governo (ILO, 2014; VALENTE et al., 2021).

5.1.2 A Logística Reversa de REEE no Brasil

A principal legislação brasileira de resíduos é a Lei 12.305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Ela estabelece a obrigatoriedade em “estruturar e implementar sistemas de logística reversa, mediante retorno dos produtos após o uso pelo consumidor”, incluindo os REEE (BRASIL, 2010).

O Acordo Setorial assinado em 2019 no Brasil, pelas entidades responsáveis pelo setor de eletroeletrônicos como fabricantes, distribuidores e comerciantes, tem como finalidade a implementação de um sistema de Logística Reversa (LR) de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes no país (MMA, 2019). No sistema estabelecido nesse Acordo, o consumidor possui dois modos de destinação dos REEE: pontos de recebimentos e coleta residencial. Os pontos de recebimentos devem estar localizados nas próprias lojas de varejo, ou em pontos de recebimento fixos (MMA, 2019). O Acordo e a legislação recente permitem o gerenciamento de REEE como resíduos não-perigosos, desde que não haja descaracterização dos equipamentos e exposição dos componentes potencialmente perigosos (BRASIL, 2020; CETESB, 2016).

Após a coleta, o pré-tratamento é uma etapa chave dentro de todo o sistema de logística reversa de REEE e consiste, basicamente, na sua separação e desmontagem. A desmontagem de REEE facilita a recuperação de componentes valiosos, além de maximizar a separação de substâncias perigosas (WANG; LI; XIA, 2016). Essa etapa pode ser a principal área de atuação das cooperativas de catadores dentro deste sistema (GIESE et al., 2021; SMA, 2012).

Já existem instituições que atuam nesse setor no Brasil, sejam cooperativas, empresas de logística ou recicladoras (CEMPRE, 2019b). A logística reversa pode gerar benefícios econômicos e sociais, possibilitando o surgimento de novos negócios, além de gerar trabalho e renda (FENG et al., 2019; SAHAJWALLA; HOSSAIN, 2020). Por isso ressalta-se a importância de estudos que forneçam, aos tomadores de decisão, informações e ferramentas eficazes para a análise e otimização de cenários (RODRIGUES; MONDELLI, 2021).

5.1.3 Viabilidade de sistemas de logística reversa

A viabilidade de sistemas de logística reversa tem sido amplamente discutida, independentemente do tipo de resíduo analisado. A Tabela 4 resume estudos identificados que analisam a viabilidade desses sistemas para os REEE.

Tabela 4: Estudos sobre viabilidade de logística reversa para REEE.

Objetivos	Autores
Utilizaram a ferramenta StEP para avaliar a cidade Kampala (Uganda) que não apresentou uma viabilidade econômica para implantação de unidades de desmontagem de REEE.	(UNIDO, 2014)
Utilizaram a ferramenta StEP para avaliar a viabilidade econômica de unidades de REEE em Phnom Penh (Camboja) e no Rio de Janeiro (Brasil). Para a situação do Camboja, o nível avançado de desmontagem de REEE se mostrou mais viável, enquanto que o nível intermediário é mais atrativo no Brasil.	(SPITZBART, 2016)
Elaboraram modelo de baixo custo para coleta de REEE, apresentando uma otimização de custos e recursos necessários para a coleta de REEE em Opole (Polônia).	(NOWAKOWSKI; KRÓL; MRÓWCZYŃSKA, 2017)
Utilizaram ferramenta StEP para avaliar a viabilidade econômica de unidades de REEE no Cairo (Egito), apontando a desmontagem avançada dos REEE como sendo o melhor cenário para essa situação.	(MOSTAFA; SARHAN, 2018)
Compararam diferentes alternativas para o serviço de coleta de REEE, apresentando uma proposta de configuração de um sistema de transporte com grande variedade de rotas de destino e utilização de veículos elétricos.	(ELIA; GNONI; TORNESE, 2019)

Além desses, um estudo analisou a integração da coleta de REEE em sistemas de coleta seletiva já existentes em um município brasileiro, através da análise de viabilidade econômica (VALENTE et al., 2021). Dentro dos cenários propostos, a inclusão de cooperativas na coleta seletiva de REEE se mostrou atrativa. O estudo identificou um ganho de USD 1.427,19/mês/cooperativa ao receber suporte de sucateiros e do governo. Esse valor diminui para 36% (USD 795,87/mês/cooperativa) e 33% (USD 737,40/mês/cooperativa), quando as cooperativas precisam pagar pelos custos de transporte e de tratamento desses resíduos, respectivamente. No cenário no qual as cooperativas também são responsáveis pelos custos do veículo de coleta e transporte, o ganho estimado é de 5% em relação ao maior ganho (USD 106,08/mês/cooperativa). Os autores ressaltam a importância do apoio do governo e todos outros envolvidos nessa cadeia, como sucateiros e comerciantes, para o sucesso dos melhores cenário.

Alguns estudos modelaram e avaliaram a viabilidade de cenários de pré-tratamento de REEE através da ferramenta *Business Plan Calculation Tool for Manual Dismantling Facilities*, desenvolvida pela Iniciativa StEP. Esta ferramenta disponibiliza os resultados

através de três níveis de desmontagem dos REEE: nível A (desmontagem avançada com separação de todos componentes do REEE), nível B (desmontagem intermediária, separando placas, cabos, entre outros) e nível C (desmontagem simples, separando apenas os componentes perigosos como baterias, etc) (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016). O estudo realizado em Kampala, Uganda foi o único que não apresentou uma unidade de REEE economicamente viável (Resultado operacional de -USD 53.000/ano para 1.000t REEE/ano), sem a aplicação de taxas de reciclagem (SPITZBART, 2016). Em Phnom Penh, Camboja o saldo anual foi de USD 118.000/ano, com Nível C de desmontagem (SPITZBART, 2016). No Cairo, Egito, para 2500 t de REEE/ano obtiveram um resultado operacional de aproximadamente USD 700.000/ano, com custos de investimento em USD 400.000 e área necessária de quase 12.000 m², para um nível de desmontagem avançado (MOSTAFA; SARHAN, 2018). Já no Rio de Janeiro, Brasil, o resultado operacional foi de USD 44.000 por ano, recomendando-se o nível de desmontagem intermediário (SPITZBART, 2016). Estes estudos, além de avaliarem a viabilidade de cenários para desmontagem de REEE, levantaram questões importantes como a necessidade do apoio do poder público na conscientização da população e no incentivo à logística reversa. Foi possível notar que, nestes casos, os níveis de desmontagem C (desmontagem avançada) e B (desmontagem intermediária) apresentaram maior viabilidade quando comparados ao Nível A (desmontagem simplificada), o que pode ser explicado pelo fato de que os resíduos vendidos sem uma desmontagem mais detalhada dos seus componentes não conseguem ter um valor de mercado tão bom quanto a estes componentes mais separados.

Estudos sobre a viabilidade da LR de REEE são importantes para os stakeholders, podendo auxiliar na determinação e avaliação de critérios para a tomada de decisão. Esses critérios podem ser referentes a: distâncias entre as unidades do sistema (recicladores, indústrias, etc.), contexto local, tipo de indústrias de reciclagem (OTTONI; DIAS; XAVIER, 2020), população atendida, preço do terreno (SHOKOUHYAR; AALIREZAEI, 2017), adesão da população à LR, criação de novos negócios, custos, geração de emprego e renda (SOUZA et al., 2015), entre outros.

Os critérios de decisão são fundamentais na análise de modelos de sistemas de logística reversa para que a solução mais viável seja aplicada na situação real. Normalmente, problemas de sustentabilidade são questões complexas e abrangem uma diversidade de stakeholders, critérios e indicadores, implicando em soluções multicritérios (ACHILLAS et

al., 2010; SOUZA et al., 2016; SOUZA et al., 2015). Por isso, é necessário aprofundar-se no levantamento das análises multicritério existentes.

5.1.4 Métodos multicritério

Os métodos multicritério de apoio à decisão são conhecidos como: auxílio à decisão por múltiplos critérios (do inglês *Multi-criteria Decision Aid* ou *Multi-criteria Decision Analysis* – MCDA); ou tomada de decisão por múltiplos critérios (do inglês *Multiple-criteria Decision-Making* – MCDM). Através desses métodos é possível avaliar problemas de decisão sob a ótica de diversos *stakeholders*, considerando complexos e variados critérios (ALMEIDA et al., 2015; GRIMES; MAGUIRE, 2020).

Esses métodos são classificados em três tipos mais comuns: problemas de escolha, ranqueamento e classificação. Os problemas de escolha permitem que apenas uma única alternativa seja selecionada. No ranqueamento, as alternativas são comparadas e ordenadas do melhor ao pior. Nos problemas de classificação ocorre a classificação das alternativas em categorias ou classes, especificadas durante a criação do modelo, que apresentam uma ordem de preferência (por exemplo: ruim; razoável; bom) (ALMEIDA et al., 2015).

Os métodos MCDA são considerados adequados para auxiliar nas avaliações de sustentabilidade, pois possuem flexibilidade para aplicação em situações com grande diversidade de informações e incertezas (CINELLI; COLES; KIRWAN, 2014). Alguns exemplos de aplicações são em projetos de construção civil (JATO-ESPINO et al., 2014), projetos de infraestrutura de transportes (BRONIEWICZ; OGRODNIK, 2020), auxílio na gestão hídrica (LAI; LUNDIE; ASHBOLT, 2008), métodos para agricultura sustentável (DE LUCA et al., 2017), entendimento do desempenho de sustentabilidade em organizações (VIVAS et al., 2019) e projetos para apoiar políticas públicas (BOGGIA; CORTINA, 2010).

É crescente a elaboração de estudos de MCDA para solução de problemas relacionados à gestão de RSU, assim como para os REEE. Alguns exemplos destes estudos estão na Tabela 5.

Tabela 5: Estudos que aplicam MCDA para gestão de RSU e REEE.

Método MCDA	Objetivo	Autores
EDAS	Gerenciar resíduos de serviços de saúde	(JU et al., 2020)
AHP e TOPSIS	Investigar os métodos térmicos na área de gerenciamento de resíduos e otimizar os métodos mais adequados	(SHAHNAZARI et al., 2020)
	Avaliar as tecnologias de tratamento para gestão integrada de RSU	(RODRIGUES; MONDELLI, 2021)
ELECTRE III	Otimizar locais para instalação de unidades de pré-tratamento de REEE	(ACHILLAS et al., 2010)
AHP	Priorizar recuperação de materiais críticos dos REEE	(GRIMES; MAGUIRE, 2020)
	Avaliar o desempenho de programas de reciclagem de REEE	(WIBOWO; DENG, 2015)
Fuzzy	Otimizar custos e recursos para a coleta de REEE	(NOWAKOWSKI; KRÓL; MRÓWCZYŃSKA, 2017)
	Selecionar um local para instalação de um aterro sanitário	(CHANG; PARVATHINATHAN; BREEDEN, 2008)
Fuzzy e TOPSIS	Priorizar critérios para implementar LR de REEE	(AGRAWAL; SINGH; MURTAZA, 2016)
CPP	Identificar as principais barreiras para implantação de LR de REEE	(VIEIRA et al., 2020)

Para a seleção do método multicritério é preciso compreender os conceitos básicos da abordagem e a avaliação que será executada. Um estudo comparou a utilização de cinco métodos de MCDA aplicados a problemas de sustentabilidade: MAUT, AHP, ELECTRE, PROMETHEE e DRSA. Todos os métodos analisados no estudo se mostraram aplicáveis, sendo o AHP o mais utilizado nas publicações atuais. Avaliados quanto à robustez, facilidade de compreensão, tratamento de incertezas, disponibilidade de software, entre outros, os métodos ELECTRE, PROMETHEE e DRSA demonstraram uma maior qualidade de resultados quando empregados para a resolução de problemas de sustentabilidade. Todos estes conseguem lidar com informações incertas (CINELLI; COLES; KIRWAN, 2014). No geral, a escolha do método implica diretamente no tipo de problema que o estudo quer resolver e suas características (GOFFI et al., 2018).

5.1.5 ELECTRE TRI

A família ELECTRE (*Elimination Et Choix Traduisant la Réalité*, em inglês *Elimination and Choice Expressing Reality*, em português Realidade por Eliminação e Escolha) inclui vários métodos que servem para: problemas de escolha, como o ELECTRE

I e ELECTRE IS; problemas de ranqueamento, como o ELECTRE II, III e IV; e problemas de classificação, como o ELECTRE TRI (ALMEIDA, 2013).

O ELECTRE TRI soluciona problemas de classificação através da alocação de cada uma das alternativas em categorias predefinidas, construindo uma relação de superação S , também conhecida como *outranking*. Para aplicação do método é preciso definir um conjunto de alternativas de decisão a_i , uma família de critérios $F = \{g_1, g_2, \dots, g_m\}$, os limiares de categorias $B = \{b_1, b_2, \dots, b_h\}$ e um conjunto de categorias $C = \{C_1, C_2, \dots, C_{h+1}\}$, sendo que o limite superior de uma categoria é o limite inferior da categoria superior seguinte (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998).

Comparando-se alternativas par-a-par (pairwise), a relação de classificação indica se uma alternativa a é ao menos tão boa quanto b_h (aSb_h). Essas preferências para cada critério são definidas através de um pseudocritério, ou seja, utiliza limiares de preferência p_j e indiferença q_j (informações intracritérios) para evitar uma mudança “repentina entre a indiferença e a preferência, existindo uma zona de hesitação representada pela preferência fraca” (ALMEIDA, 2013).

Para validar essa relação de aSb_h é preciso verificar se uma maioria de critérios está a favor dessa afirmação (concordância) e se nenhum dos critérios da minoria se opõe fortemente à afirmação (não discordância). Para essa construção de S são definidos pesos para o grau de importância de cada um dos critérios $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ (para o teste de concordância) e limiares de veto $V = \{v_{(bh)}, v_{2(bh)}, \dots, v_{m(bh)}\}$ (para o teste de discordância). Ainda é preciso calcular o grau de credibilidade dessa afirmação seguindo as etapas das Equações 1 a 4 (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998):

- Índice de concordância parcial (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998):

Se $g_j(b_h) - g_j(a_i) \geq p_j(b_h)$, então $c_j(a_i, b_h) = 0$

Se $g_j(b_h) - g_j(a_i) \leq q_j(b_h)$, então $c_j(a_i, b_h) = 1$ (Eq. 1)

$c_j(a_i, b_h) = \frac{p_j(b_h) + g_j(a_i) - g_j(b_h)}{p_j(b_h) - q_j(b_h)}$, de outra forma

- Índice de concordância (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998):

$$C(a_i, b_h) = \frac{\sum [k_j \cdot c_j(a_i, b_h)]}{\sum k_j} \quad (\text{Eq. 2})$$

- Índice de discordância (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998):

Se $g_j(a_i) \leq g_j(b_h) + p_j(b_h)$, então $d_j(a_i, b_h) = 0$

Se $g_j(a_i) > g_j(b_h) + v_j(b_h)$, então $d_j(a_i, b_h) = 1$ (Eq. 3)

$\in [0,1]$ de outra forma

- Grau de credibilidade (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998):

$$\sigma(a_i, b_h) = C(a_i, b_h) \cdot \prod \frac{[1-d_j(a_i, b_h)]}{[1-c(a_i, b_h)]} \quad (\text{Eq.4})$$

A relação resultante de superação utiliza um parâmetro chamado nível de corte (λ), com valor entre 0,5 e 1,0 (MOUSSEAU; SLOWINSKI; ZIELNIEWICZ, 2000). O valor 1,0 representa uma situação mais restritiva implicando no aumento da ocorrência de relações de incomparabilidade entre as alternativas (SANTOS, 2012).

Ao final, dois procedimentos são avaliados: pessimista (conjuntivo) e otimista (disjuntivo). No procedimento pessimista, cada alternativa é comparada com o limite inferior da segunda melhor categoria. Assim, se a alternativa for preferível ao limite superior dessa categoria, ela será designada para a melhor categoria. Caso contrário será comparada com o limite inferior da terceira categoria e assim sucessivamente. Já no procedimento otimista, a alternativa é comparada com o limite superior da categoria inferior, ou seja, se a fronteira da categoria inferior não for preferível à alternativa, ela será alocada na categoria superior (LIMA; ALMEIDA; ALMEIDA, 2010).

No geral, o ELECTRE TRI é utilizado em diversas áreas, assim como na resolução de problemas que envolvem a sustentabilidade. Alguns exemplos: classificação de riscos de instalação de dutos de gás (BRITO; ALMEIDA; MOTA, 2010), elaboração de mapas para uso e ocupação do solo (JOERIN; THÉRIALULT; MUSY, 2001), identificação de áreas para implantação de agricultura sustentável (MENDAS; DELALI, 2012), identificação de locais para instalação de fazendas de painéis solares (SÁNCHEZ-LOZANO et al., 2014), avaliação da sustentabilidade de transporte público (ROMERO-ANIA; GUTIÉRREZ; OLIVA, 2021) e avaliação da atratividade de projetos para construção civil (DE ARAÚJO; ALENCAR; MOTA, 2022).

No Brasil, um estudo utilizou o ELECTRE TRI para demonstrar a viabilidade econômica para seleção de modelos de estações de tratamento de água (ETAs). O estudo

indicou ETAs com baixo e alto custo para uma seleção ideal no cenário econômico dependendo da especificidade de cada local (GOFFI et al., 2018).

Outro trabalho no Brasil realizou um mapeamento de locais adequados para recebimentos de resíduos inertes de pequenas e médias cidades, principalmente resíduos de construção e demolição. Esses locais foram classificados em três níveis: alta, média e baixa aptidão, além de utilizarem um sistema de informação geográfica (GIS) para auxiliar os tomadores de decisão. Através do ELECTRE TRI, os autores compararam os resultados obtidos com o GIS, identificando diferenças, mas com algumas alternativas alocadas nas mesmas categorias pelos dois modelos (BILUCA; AGUIAR; TROJAN, 2020).

Como é possível notar, ainda são poucos os estudos que utilizam o ELECTRE TRI relacionado à gestão de resíduos. Mas todos mostram a importância da utilização de métodos robustos e que considerem diversos critérios ao mesmo tempo, como é o caso do ELECTRE TRI, desde que levantado os parâmetros corretamente.

5.2 MATERIAIS E MÉTODO

A estrutura do presente estudo seguiu três etapas principais (Figura 3): revisão da literatura, estruturação do modelo proposto, e aplicação e análise dos dados.

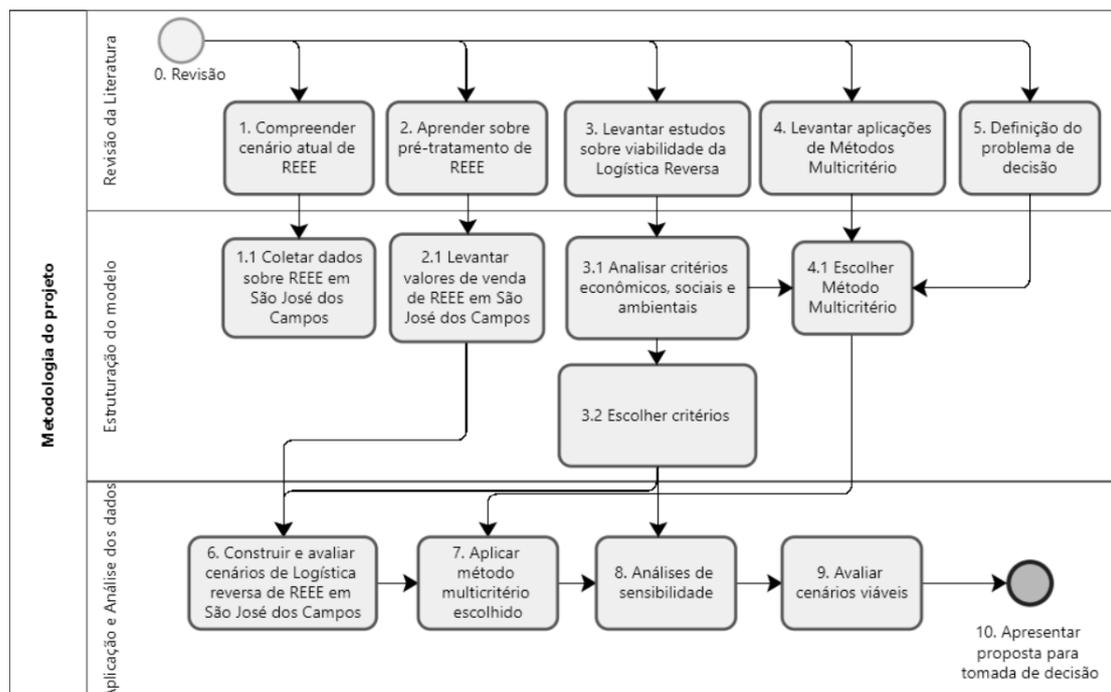


Figura 3: Estrutura da metodologia.

5.2.1 Revisão da literatura

O primeiro passo compreendeu investigar o cenário atual dos REEE no Brasil, além de aprender sobre o seu pré-tratamento. O levantamento das publicações existentes utilizou a ferramenta de busca do Google e as bases de artigos científicos Scopus e Web of Science (WOS) em novembro de 2020, adotando os termos-chave: “(WEEE, waste electrical and electronic equipment, e-waste) AND cooperative AND (recycl*, pretreatment, dismantling, take-back) AND Brazil”.

Para os estudos sobre a viabilidade da implantação dos sistemas de logística reversa de REEE, combinaram-se os termos: “(WEEE, waste electrical and electronic equipment, e-waste) AND (takeback, take-back, reverse logistics, pre-treatment, pretreatment, dismatling) AND (feasibility, econom*, social, costs e investment)”. O levantamento de estudos sobre aplicação dos métodos multicritério, em especial o ELECTRE TRI (outubro de 2021) utilizou os termos *waste AND ELECTRE TRI*.

A ferramenta do Google foi importante para conhecer o forte trabalho desempenhado, principalmente, pela Universidade das Nações Unidas (UNU) e a Iniciativa StEP (Solving the E-waste Problem). Essas organizações são responsáveis pelo fornecimento de grande parte das informações sobre gestão de resíduos eletroeletrônicos no mundo. Suas publicações apresentam dados sobre a geração de REEE, orientações sobre contaminação e periculosidade, desmontagem e outros tópicos sobre REEE.

5.2.2 Estruturação do modelo

A Iniciativa StEP desenvolveu uma ferramenta chamada de *Business Plan Calculation Tool for Manual Dismantling Facilities*. Seu principal objetivo é auxiliar empreendedores que desejam instalar plantas viáveis (economicamente e ambientalmente) de REEE. Com os resultados é possível planejar uma unidade de desmontagem de REEE e estimar os recursos necessários para sua instalação (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016).

De forma sucinta, a estrutura geral para aplicação da ferramenta StEP consiste na entrada de dados gerais como salários, jornada de trabalho, custos, definição de fluxos, disposição adicional, preços, entre outros. Os resultados são definidos em três níveis de desmontagem dos REEE. O Nível A (simples) considera somente remoção dos componentes

perigosos (ex. baterias, toners, tubos CRT) e mais valiosos (ex. placas de circuito impresso). O Nível B (intermediário) prioriza a desmontagem manual dos componentes, considerando um esforço razoável (ex.: separar placas, cabos, carcaças plásticas, sucata metálica, drives, etc.). O Nível C considera uma separação avançada dos componentes (ex. desmontagem de drivers, separação dos vidros do CRT (frente e fundo) e separação mecânica do cobre de cabos) (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016).

O escopo deste artigo é o município de São José dos Campos, localizado no estado de São Paulo. O estudo utilizou o trabalho de Abbondanza e Souza (2019) para obter estimativas da geração de REEE domésticos pelos moradores do município - cerca de 2,8kt de REEE ao ano (Apêndice A). O presente trabalho não considerou os grandes eletrodomésticos, uma vez que a ferramenta StEP não os utiliza nos cálculos (BALDE et al., 2015), e assumindo que as unidades analisadas não processam estes REEE. Entrevistas com 5 empresas de pré-tratamento de REEE que atendem o município (no período de agosto a novembro de 2020) obtiveram informações de valores de mercado (Apêndice B) para venda dos REEE, sendo considerados nos modelos os melhores valores. Uma das empresas e a Coopertech (Cooperativa de Resíduos Eletrônicos – uma cooperativa dedicada aos REEE em São José dos Campos, desde 2016) forneceu as distâncias e custos referentes aos transportes e coleta desses materiais (Apêndice C). O cálculo dos custos estabeleceu um caminhão do tipo truck, com capacidade de 10 a 14 t – dados obtidos através de Coelho (2010), considerando uma autonomia de 2,5 km por litro de diesel (DEVA, 2016), no valor de R\$ 3,62/litro nos postos de combustíveis em Novembro de 2020, também contemplando os pedágios através do site Mapeia (<https://www.mapeia.com.br/>) em Novembro de 2020. As distâncias informadas foram categorizadas como local (0-5km in São José dos Campos), regional (5–500 km to Sorocaba), e longas distâncias (over 500 km to Paraná).

Para os cenários de cooperativas, a Coopertech informou a tributação de 23%, e a remuneração dos cooperados, o valor do salário mínimo brasileiro, impostos (Apêndice D) e despesas (Apêndice E). Para pequenas empresas privadas, a tributação é de 67% (GUIA TRABALHISTA, 2020). O restante dos dados (ex. custos e preços) foi o mesmo para as duas situações, complementado pelo levantamento online de dados como salários e equipamentos, feito em novembro de 2020 (Apêndices F e G). A metodologia mais detalhada para uso da ferramenta pode ser encontrada no guia original do StEP (SPITZBART; HERBECK; SCHLUEP, 2016).

5.2.3 *Elaboração das alternativas e definição dos critérios de avaliação*

A Tabela 6 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta as alternativas (cenários) consideradas neste estudo para a análise de viabilidade da implantação de unidades de pré-tratamento de REEE no município de São José dos Campos. O estudo propôs 34 alternativas (cenários) para cada tipo de empresa (cooperativas ou empresas privadas de pequeno porte), que possibilitaram a interpretação dos resultados e discussão da alternativa mais viável.

Tabela 6: Alternativas para análise de viabilidade de implantação das unidades.

Alternativas		Nº de unidades implantadas no município	Porcentagem de entrega na unidade	Tipo de contrato do imóvel	Tipo de resíduo recebido
Cooperativa	Empresa				
C1	E1	1	0%	Alugado	Todos
C2	E2	1	10%	Alugado	Todos
C3	E3	1	20%	Alugado	Todos
C4	E4	1	30%	Alugado	Todos
C5	E5	1	50%	Alugado	Todos
C6	E6	1	100%	Alugado	Todos
C7	E7	1	0%	Alugado	Somente CRT
C8	E8	1	0%	Alugado	Somente celulares
C9	E9	1	0%	Alugado	Somente computadores
C10	E10	1	0%	Alugado	Todos, exceto CRT
C11	E11	1	0%	Alugado	Todos, exceto celulares
C12	E12	1	0%	Alugado	Todos, exceto computadores
C13	E13	2	0%	Alugado	Todos
C14	E14	3	0%	Alugado	Todos
C15	E15	4	0%	Alugado	Todos
C16	E16	5	0%	Alugado	Todos
C17	E17	6	0%	Alugado	Todos
C18	E18	1	0%	Comprado	Todos
C19	E19	1	10%	Comprado	Todos
C20	E20	1	20%	Comprado	Todos
C21	E21	1	30%	Comprado	Todos
C22	E22	1	50%	Comprado	Todos
C23	E23	1	100%	Comprado	Todos
C24	E24	1	0%	Comprado	Somente CRT
C25	E25	1	0%	Comprado	Somente celulares
C26	E26	1	0%	Comprado	Somente computadores
C27	E27	1	0%	Comprado	Todos, exceto CRT
C28	E28	1	0%	Comprado	Todos, exceto celulares
C29	E29	1	0%	Comprado	Todos, exceto computadores
C30	E30	2	0%	Comprado	Todos
C31	E31	3	0%	Comprado	Todos
C32	E32	4	0%	Comprado	Todos
C33	E33	5	0%	Comprado	Todos
C34	E34	6	0%	Comprado	Todos

O parâmetro de número de unidades implantadas no município é referente ao total de unidades que o município terá, variando de 1 a 6 unidades. A porcentagem de entrega nas unidades considerou qual parcela dos REEE gerados é entregue diretamente na unidade, ou seja, não gerando custos de deslocamento para coleta, variando entre 0%, 10%, 20%, 30%, 50% e 100%. Quanto ao tipo de contrato do imóvel, as alternativas consideraram imóveis alugados e comprados para as mesmas situações.

Quanto aos tipos de REEE recebidos, há cenários em que todas as unidades recebem todos os tipos de REEE. Aquelas alternativas contendo unidades que recebem apenas um tipo de REEE tiveram seus resultados combinados com as outras alternativas complementares que recebem todos REEE, exceto este. Por exemplo, a alternativa terá 2 unidades de desmontagem no município, sendo uma delas recebendo somente celulares, e a outra recebendo todos REEE, exceto celulares. Assim, todas as alternativas consideram o recebimento da mesma quantidade de REEE (equivalente ao total gerado no município), variando de acordo com a **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Os critérios selecionados para avaliação das alternativas, principalmente visando a geração de emprego e viabilidade econômica foram: Resultado Operacional (em R\$/ano; Balanço orçamentário anual: Receita - Despesas), Custos de Investimento (R\$/ano, com tempo de retorno em 5 anos), área necessária para as unidades (m²) e número de trabalhadores necessários (pessoa).

5.2.4 Aplicação do ELECTRE TRI

Para essa proposta, os métodos para problemas de classificação (como o ELECTRE TRI) são os mais indicados, uma vez que o objetivo é classificar em categorias as diversas alternativas ao invés de se obter um único resultado. O ELECTRE TRI necessita de algumas definições como limiares e pesos para sua aplicação (MOUSSEAU; SLOWINSKI, 1998). A realização de uma pesquisa com 20 especialistas, na área de REEE permitiu a determinação dos pesos para cada um dos critérios analisados (Apêndice L). Essa determinação utilizou o Método dos Swings (PARNELL; TRAINOR, 2009) que consiste na atribuição de valores com base na importância e variação das escalas. Os entrevistados definiram qual o nível de importância (de 0 a 100) de cada um desses critérios. A normalização desses valores ocorreu através da alteração da escala de 0 a 100 para 0 a 1.

A definição de parâmetros para aplicação do ELECTRE TRI, como os nível de corte, limiares de classe, preferência, indiferença e veto, pode ser realizada através de inferência ou por determinação do decisor (MOUSSEAU; SLOWINSKI; ZIELNIEWICZ, 2000). Essa determinação do decisor pode dificultar a aplicação do método em razão de consumir bastante tempo do decisor ou tornar a escolha desses valores enviesada (BARROS; PEREIRA; ROBOREDO, 2021).

O ELECTRE tree (BARROS; PEREIRA; ROBOREDO, 2021) é um algoritmo criado para inferência desses parâmetros através de um conjunto de modelos multicritério afim de gerar soluções robustas. Nessa proposta não é indicada a inferência de todos os parâmetros, preservando o conhecimento que o tomador de decisão possui do problema. O algoritmo proposto funciona através da otimização dos parâmetros, dividindo um problema complexo em problemas menores para evitar soluções tendenciosas. Ainda, assim como explicado no ELECTRE TRI, o algoritmo realiza interações otimistas e pessimistas. A metodologia detalhada do ELECTRE tree pode ser encontrada em (BARROS; PEREIRA; ROBOREDO, 2021).

O ELECTRE tree é um algoritmo de maximização dos critérios, ou seja, o maior valor do critério analisado ficará alocado na melhor categoria (ordem de preferência). O único critério que necessitou inversão da ordem de preferência foi referente à área necessária para as unidades, assim, quanto menor a área melhor para o problema. Essa inversão ocorreu através da divisão do valor calculado pelo maior valor da maior área. O estudo realizou oito testes para escolha do conjunto de alternativas a serem selecionadas para aplicação das análises de sensibilidade (AS) e determinou que as alternativas fossem classificadas em três classes: A (melhor), B (intermediária) e C (pior).

Foram feitos diferentes testes com ajustes nos parâmetros. Os testes 1 e 2 utilizaram a inferência do ELECTRE tree para todos parâmetros, tanto para pessimista quanto otimista, respectivamente. Os testes 3 e 4 usaram a média dos pesos determinados pelos especialistas na survey (pessimista e otimista). Os testes 5 e 6 consideraram a moda dos pesos determinados pelos especialistas (pessimista e otimista). Os testes 7 e 8 consideraram a mediana dos pesos determinados pelos especialistas (pessimista e otimista). O ELECTRE tree definiu o restante dos outros parâmetros dos testes 3 ao 8.

Após a definição completa das alternativas, critérios, nível de corte, limiares de classe, preferência, indiferença e veto, os autores aplicaram o método ELECTRE TRI para os testes. O software para a aplicação do ELECTRE TRI foi J-Electre-v3.0 (PEREIRA;

DIAS; NEPOMUCENO, 2021). Nele é possível definir o método da família ELECTRE, número de classes, valor do nível de corte, número de alternativas e critérios do problema de decisão.

Após aplicação do ELECTRE TRI, o estudo excluiu os testes 1 e 2. Essa decisão foi tomada com base nas informações de que a utilização da inferência de todos os parâmetros não é considerada a ideal, já que o ELECTRE tree (BARROS; PEREIRA; ROBOREDO, 2021). Além disso, tiveram o nível de acurácia menor que outros testes. Os testes com a média, moda e mediana não se mostraram divergentes para as alternativas que se enquadraram como AA, AB ou BA nos dois procedimentos. Os autores compararam as alternativas de todos os testes realizados, percebendo que havia grande semelhança entre elas, mas sua quantidade variou de 27 alternativas, para o teste 4, a 131, para o teste 5, por exemplo, uma vez que os testes com análise pessimista são mais restritivos. Essas 27 alternativas do teste 4 foram escolhidas para realização das AS.

Ao final da rodada de testes, as alternativas (cenários) com o melhor desempenho nos testes de melhor performance (as que ficaram nas classes AA, AB ou BA nestes testes), foram selecionadas para as análises de sensibilidade. Nestas análises, os autores aplicaram a ferramenta StEP, o ELECTRE tree e o ELECTRE TRI para essas 27 alternativas.

Posteriormente, o estudo realizou oito análises de sensibilidade (AS). Buscando representar a competição real entre os sistemas de logística reversa e os canais informais no Brasil, a AS 1 reduziu em 30% o total de todos os REEE recebidos na unidade, subtraindo 50% de celulares e computadores, considerando o procedimento otimista no ELECTRE tree. A AS 2 dobrou o valor dos salários dos cooperados (procedimento otimista no ELECTRE tree). A AS 3 utilizou o preço médio, em vez do máximo, para os valores de mercado para venda dos resíduos (procedimento otimista no ELECTRE tree). As AS 4 e 5 combinaram as AS 1, 2 e 3 (usando procedimento otimista e pessimista no ELECTRE tree, respectivamente). A AS 6 combinou as alternativas, mas fixou os pesos a 0,82 para os critérios de resultado operacional e número de funcionários, com o intuito de verificar se o peso maior para o critério de quantidade de funcionários poderia impactar no resultado final, já que o peso do critério resultado operacional era menor (procedimento otimista no ELECTRE tree). A AS 7 também combinou as alternativas, mas aumentou o peso do critério resultado operacional para 0,87, para verificar a influência do critério de quantidade de funcionários sobre o resultado operacional, como na AS 6 (procedimento otimista no

ELECTRE tree). A AS 8 excluiu o critério de quantidade funcionários para verificar a possibilidade de dependência entre esse critério e o resultado operacional.

Como já explicado, o ELECTRE TRI gera resultados em procedimentos pessimistas e otimistas para cada uma das alternativas analisadas, podendo ocorrer divergências entre esses resultados (COSTA et al., 2007; MONTEIRO; PEREIRA; COSTA, 2018). O resultado final de cada alternativa adotou o procedimento pessimista, sendo o procedimento mais adotados em grande parte dos estudos, por considerar uma visão mais exigente do tomador de decisão (BRITO; ALMEIDA; MOTA, 2010; DIAS et al., 2002; MONTEIRO; PEREIRA; COSTA, 2018; SÁNCHEZ-LOZANO et al., 2014).

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os Apêndices A-H apresentam todos os dados levantados para preenchimento da ferramenta e o Apêndice L os pesos definidos pelos especialistas. O Apêndice M apresenta os resultados analisados através da aplicação da ferramenta StEP. O custo de investimento variou de R\$ 46.218 a R\$ 9.943.572 (USD 256.972 a USD 2.784.200.160 – dólar a R\$ 5,56 em outubro de 2021). Já o resultado operacional foi de -R\$ 1.083.852 a R\$ 3.070.057 (-USD6.026.217 a USD17.069.517). A característica principal dos cenários mais viáveis é a operação de apenas uma única unidade no município.

Sobre a quantidade de trabalhadores, os níveis de desmontagem influenciaram o resultado, variando entre 8 e 48 trabalhadores, em geral alternando os Níveis A, B e C. Aparentemente, quanto maior o nível de processamento dos REEE, maior será a quantidade necessária de trabalhadores, o que interfere nos custos operacionais anuais (salários). A área necessária ficou entre 2.163 e 4.638 m², apontando que a separação avançada dos REEE (Nível C) resulta em uma área de trabalho maior quando comparada ao nível mais baixo de processamento.

O Apêndice N apresenta os resultados dos limiares inferidos através do ELECTRE tree. Para todos os testes, os valores de lambda se encontraram na faixa de 0,69 e 0,75. Os testes que adotaram o procedimento otimista no ELECTRE tree tiveram sua acurácia maior que 0,80, sendo que o teste 4 apresentou a melhor acurácia e lambda mais restritivo quando comparado aos outros testes. Com todos os parâmetros necessários para aplicação do método ELECTRE TRI no software J-electre, a Tabela apresenta a categorização das alternativas para os procedimentos pessimista e otimista.

Tabela 7: Categorias geradas pelo ELECTRE TRI para os procedimentos pessimista e otimista.

Teste 1		Teste 2		Teste 3		Teste 4	
AA	58	AA	4	AA	67	AA	3
BA ou AB	39	BA ou AB	35	BA ou AB	63	BA ou AB	24
BB	36	BB	17	BB	13	BB	43
BC ou CB	27	BC ou CB	39	BC ou CB	19	BC ou CB	44
CC	7	CC	26	CC	1	CC	23
AC ou CA	1	AC ou CA	47	AC ou CA	5	AC ou CA	31
Teste 5		Teste 6		Teste 7		Teste 8	
AA	73	AA	3	AA	62	AA	5
BA ou AB	58	BA ou AB	50	BA ou AB	48	BA ou AB	37
BB	10	BB	14	BB	34	BB	28
BC ou CB	18	BC ou CB	48	BC ou CB	17	BC ou CB	48
CC	4	CC	22	CC	0	CC	22
AC ou CA	5	AC ou CA	31	AC ou CA	7	AC ou CA	28

Como explicado na Seção 5.2.4, o Teste 4 utilizou a média dos pesos dados pelos especialistas. Os resultados referentes às categorias AA, BA ou AB não apresentaram diferença significativa quando comparado aos testes com média e moda desses pesos. Como a quantidade de alternativas categorizadas como AA, AB ou BA (melhores classes) no Teste 4 era significativa e a acurácia foi de 0,84, as análises de sensibilidade posteriores utilizaram as 27 alternativas identificadas nessas respectivas categorias desse teste (Tabela 8). Considera-se este um número razoável de alternativas para uma nova modelagem MCDA, uma vez que estas alternativas identificadas ainda representam uma considerável variedade de cenários de implantação das unidades de pré-tratamento. Por sua vez, as alternativas excluídas apresentaram os piores desempenhos nos critérios de escolha.

Tabela 8: Alternativas selecionadas para as análises de sensibilidade.

Alternativas	Nível	Alternativas	Nível	Alternativas	Nível
C1	B	C14	B	E4	B
C2	B	C15	B*	E5	B
C3	B	C16	B*	E6	B
C4	B	C17	A	E7-E10	B
C5	B	C17	B	E8-E11	B
C6	B	C17	C	E13	B
C7-C10	B	E1	B	E14	B
C8-C11	B	E2	B	E15	B*
C13	B	E3	B	E16	B

*Alternativas categorizadas como A nos dois procedimentos (pessimista e otimista).

As alternativas selecionadas contêm unidades referentes a cooperativas e empresas, mostrando que ambos os tipos de empresa têm potencial de viabilidade. As alternativas C15, C16 e E15 ficaram na categoria A em ambos os procedimentos (otimista e pessimista). Essas alternativas representam situações em que existem mais de uma unidade de pré-tratamento de REEE espalhadas no município - 4, 5 e 4 unidades, respectivamente - indicando a maior viabilidade de implantação de mais de uma unidade. Quanto ao nível de desmontagem, das 27 alternativas analisadas apenas duas não representavam o nível B (nível intermediário de desmontagem). Tal fato aponta o nível intermediário de desmontagem como sendo o mais vantajoso para as alternativas analisadas, ou seja, tanto uma remoção “grosseira” de componentes perigosos e valiosos (nível A) ou uma separação refinada de partes que exija maior trabalho e tecnologia, não se mostraram economicamente viáveis (nível C).

Outros estudos que utilizaram a ferramenta StEP e avaliaram a receita, condições gerais, resultados e custos operacionais apresentaram resultados semelhantes, recomendando o nível B de desmontagem para o Rio de Janeiro no Brasil (SPITZBART, 2016) e nível C para Kampala na Uganda (UNIDO, 2014), Phnom Penh no Camboja (SPITZBART, 2016) e Cairo no Egito (MOSTAFA; SARHAN, 2018).

Todas as 27 alternativas selecionadas no Teste 4 possuem o aluguel como tipo de contrato de imóvel. A escolha do Teste 4 pode ter tendenciado essa situação, uma vez que as alternativas de compra de imóvel apareceram nos outros testes para as categorias AA, AB ou BA, mas não nas 27 desse teste, ficando alocadas em outras categorias abaixo dessas. Isso pode ser explicado devido ao fato de que, apesar da ferramenta StEP apresentar um tempo de retorno de 5 anos, o custo de um imóvel comprado é superior ao aluguel, impactando diretamente no critério de custos de investimento, podendo também ter influenciado esse resultado. Um cenário interessante seria a cessão de um espaço público pela prefeitura do município; assim não teriam esse alto custo de investimento para situações de compra de imóvel (GHISOLFI et al., 2017), tornando as alternativas mais viáveis, além de gerar maior retorno financeiro. A criação de políticas públicas é fundamental para garantir o sucesso dessas operações, além de envolver os setores formal e informal para potencializar os programas de coleta seletiva (GUTBERLET, 2015).

Os Apêndices O-S apresentam os resultados dos 4 critérios analisados através da aplicação da ferramenta StEP e os níveis de corte e limiares inferidos através do ELECTRE tree para todas as análises de sensibilidade. Com todos os parâmetros necessários para

aplicação do método ELECTRE TRI no software J-electre, a Tabela 9 mostra a categorização obtida através do procedimento pessimista para todas as análises de sensibilidade realizadas e para o Teste 4. O Apêndice T apresenta a mesma classificação, mas para o procedimento otimista.

Tabela 9: Categorização pessimista das alternativas para o Teste 4 e as análises de sensibilidade.

Alternativas	Teste 4	AS 1	AS 2	AS 3	AS 4	AS 5	AS 6	AS 7	AS 8	
C1	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
C2	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
C3	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
C4	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
C5	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
C6	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
C7-C10	B	B	A	C	C	B	A	C	B	B
C8-C11	B	B	A	C	C	B	A	C	B	B
C13	B	B	B	B	B	B	A	C	B	B
C14	B	B	A	B	B	B	A	C	B	B
C15	B	A	B	B	B	B	A	C	B	B
C16	B	A	B	B	B	B	B	C	B	B
C17	A	B	C	C	C	C	B	C	C	C
C17	B	B	C	C	C	C	B	C	C	C
C17	C	B	C	C	C	C	C	C	C	C
E1	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
E2	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
E3	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
E4	B	B	C	C	C	C	B	C	C	A
E5	B	B	C	C	C	C	B	C	B	A
E6	B	B	C	C	C	C	B	C	B	A
E7-E10	B	B	B	C	C	B	A	C	B	C
E8-E11	B	B	C	C	C	B	A	C	B	C
E13	B	B	B	C	C	B	A	C	B	B
E14	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C
E15	B	A	C	C	C	C	C	C	C	C
E16	B	B	C	C	C	C	C	C	C	C

Como é possível notar, as análises de sensibilidades impactaram significativamente a categorização das alternativas. No teste 4, quase todas as alternativas ficaram na categoria B, mas nas análises de sensibilidade a maioria predominante foi a categoria C, mostrando que as alternativas são sensíveis a alterações que podem surgir no mercado e na quantidade de REEE recebidos. É importante reforçar que essas análises afetaram expressivamente os valores dos custos de investimento e resultados operacionais (AS 1: -R\$ 899.538 a -R\$ 28.643 e -R\$ 1.088.664 a R\$ 554.248, respectivamente; AS 2: -R\$ 998.898 a -R\$ 77.081 e R\$ 574.650 a R\$ 2.776.997; AS 3: -R\$ 998.898 a -R\$ 77.081 e -R\$ 1.254.460 a R\$ 1.240.947; e AS 4: -R\$ 899.538 a -R\$ 28.643 e -R\$ 1.919.295 a R\$ 79.735), como é possível verificar nos Apêndices O-R. O mercado de REEE sofre com a flutuação do dólar e com a

quantidade de resíduo que é processado em cada unidade (VALENTE et al., 2021). É necessário entender e considerar essas alterações para manter a viabilidade do negócio.

Em alguns casos, como na AS 5, as alternativas que tiveram resultados operacionais negativos foram alocadas nas melhores categorias. Uma explicação é que essas alternativas resultaram em maiores números de funcionários, que idealmente deve ser maximizado, mas que afeta os custos. Os autores optaram por realizar as AS 6 e 7 com o intuito de comparar se a semelhança no peso desses critérios poderia ter influenciado esse resultado, mas não tiveram grandes alterações. Vale ressaltar que diversas alternativas não resultaram nas mesmas categorias para os procedimentos pessimistas e otimistas. Em algumas situações nas análises de sensibilidade, mais da metade das alternativas ficaram em classes opostas, ou seja, se tornaram incomparáveis. Costa et al. (2007) ressaltaram que alguns critérios pertencentes à dimensão preço (como os custos) podem induzir a situações divergentes.

Essa situação pode indicar que o modelo não foi capaz de realizar uma comparação adequada entre os cenários pessimistas e otimistas, e classificou a alternativa em uma das categorias. Isso indica a possível presença de inconsistências no modelo proposto que não foram detectadas pelos métodos tradicionais. A incomparabilidade dessas alternativas pode estar associada ao modelo construído (como os critérios), às escalas de julgamento (nesse caso o peso dos critérios) ou ao sistema de coleta de dados (como as escalas utilizadas). Caso seja necessária uma convergência dos resultados desses procedimentos, o sistema de categorização precisaria ser reavaliado. No entanto, a existência de incomparabilidade no modelo não indica uma falha no sistema de avaliação, podendo ser um comportamento não homogêneo da alternativa (COSTA; FREITAS, 2005; COSTA et al., 2007).

Uma hipótese para essa inconsistência pode ser explicada através das relações de causa-efeito (MONTIBELLER; BELTON, 2006). Mapas causais podem ser usados antes da aplicação dos MCDA e auxiliam na identificação critérios intermediários, ou seja, verificam a relação entre e os critérios e o resultado final, podendo existir causas e efeitos intermediários entre eles. Quando não se define quais são os critérios intermediários pode ocorrer uma redundância nos resultados, o que deve ser evitado (MONTIBELLER; BELTON, 2006; SOUZA et al., 2015).

A AS 8 excluiu o critério de quantidade de funcionários para verificar a possibilidade da existência dessa relação de causalidade, e sua influência na alocação das alternativas com resultado operacional negativo em categorias melhores do que as com resultado operacional positivo. Ou seja, os critérios acabam sendo dependentes, pois o resultado operacional

depende dos custos, como salários. Embora os critérios estejam na mesma direção de preferência, maximizar a geração de emprego provoca efeito inverso na maximização do resultado operacional, não sendo possível a maximização dos dois ao mesmo tempo. Como é possível notar, é provável a existência dessa relação, pois removendo o critério de funcionários, as alternativas de C1 a C6 (referentes as cooperativas com uma unidade), que possuem resultado operacional positivo, ficaram na categoria A, resultado mais coerente. No entanto, as alternativas E1 a E6 (referente as unidades representadas por empresas) também ficaram na categoria A, mesmo apresentando resultado operacional negativo, mas possuindo os mesmos valores para o critério de custos de investimento que as cooperativas. Para evitar situações desse tipo, poderia ser considerada a remoção das alternativas com resultado operacional negativo, ou seja, que não possuem lucro, com o intuito de realizar a modelagem no ELECTRE TRI somente para os cenários com saldo positivo.

Grande parte das alternativas que ficaram nas categorias A e B, principalmente para as cooperativas, representam situações nas quais existem pelo menos 2 unidades de pré-tratamento de REEE no município. Observa-se que sistemas descentralizados de reciclagem podem favorecer sua implantação, uma vez que não precisam percorrer longas distâncias se existe mais de uma unidade na região, diminuindo seu custo com transporte e oportunizando parcerias entre as unidades (VALENTE et al., 2021). Também não demandam grandes áreas, facilitando o aluguel, compra ou cessão do espaço. Os custos de investimento e o resultado operacional não possuem grandes divergências quando comparados às alternativas com apenas uma unidade, mas a geração de emprego é relativamente maior, podendo ser um importante critério para o tomador de decisão.

Algumas limitações do modelo podem ter influenciado no resultado final. Por exemplo, a estimativa com custos de transportes é referente às informações coletadas pelas empresas e cooperativa do município. O estudo não realizou a criação de roteiros logísticos para estimativa desses custos que podem sofrer flutuação com a troca de fornecedores/compradores e aumento de combustível. Em algumas situações, a coleta de REEE possui um frete fixo estabelecido pela empresa contratada ou está embutido no seu valor.

A ferramenta StEP não considera os grandes eletrodomésticos nos seus cálculos. Essa situação também pode influenciar na operação real da coleta e pré-tratamento dos REEE,

uma vez que representam cerca de 66,14% de REEE/per capita gerados em São José dos Campos (ABBONDANZA; SOUZA, 2019).

Pode-se recomendar o nível de desmontagem intermediário (B) dos REEE e a implantação de mais de uma unidade de pré-tratamento desses resíduos no município de São José dos Campos, e em cidades com situações semelhantes. Ressalta-se que o incentivo de políticas públicas e apoio do governo e patrocinadores podem impactar positivamente na viabilidade dessas unidades.

5.4 CONCLUSÃO

Este trabalho realizou uma avaliação da viabilidade de implantação de um sistema de logística reversa de REEE, em um estudo de caso do município de São José dos Campos/SP. É importante ressaltar a grande contribuição no fornecimento de dados do setor de REEE que ainda são difíceis de encontrar, principalmente relacionados a países em desenvolvimento, como o Brasil. Também há poucos estudos referentes à gestão de resíduos que utilizam o método multicritério ELECTRE TRI como método de análise e apoio à decisão. Os autores esperam que o estudo possa contribuir para a divulgação do conhecimento científico e inspiração de novos estudos no país e no mundo.

Este estudo avaliou cenários tanto para empresas quanto para as cooperativas. No geral, tanto as cooperativas quanto as empresas ficaram bem classificadas, indicando que ambos os tipos de negócio têm potencial de viabilidade. O nível intermediário (B) de desmontagem apresentou a maior viabilidade comparado aos níveis A e C, sendo o nível recomendado para o contexto estudado. A maioria das alternativas que ficaram em categorias superiores são referentes às situações que representam mais de uma unidade de REEE no município, indicando que a descentralização pode gerar unidades menores e mais baratas, e menores distâncias de coleta e transporte de REEE. O ELECTRE TRI alocou as alternativas com 4 unidades para cooperativas (C15) e empresas (E15), e 5 unidades para cooperativas (C16) na categoria A pelos dois procedimentos (pessimista e otimista), permitindo recomendar esse número de unidades para o contexto em estudo.

As análises de sensibilidade foram importantes para comprovar a vulnerabilidade dos cenários frente às adversidades do mercado de resíduos, como flutuações no preço de venda, diminuição da quantidade de resíduo processado e até mesmo despesas com funcionários.

Mesmo assim, as alternativas alocadas nas melhores categorias no primeiro teste se mantiveram as mesmas nas AS.

Algumas análises de sensibilidade apresentaram valores discrepantes às categorias alocadas. A hipótese é de que não é possível maximizar ao mesmo tempo critérios que são dependentes, como o caso entre custos e quantidade de funcionários. Limitações como a remoção de alternativas com resultado operacional negativo; inclusão de grandes eletrodomésticos e comparabilidade de informações de aluguel e compra de imóveis na ferramenta StEP; e criação de roteiros logísticos podem melhorar a análise do modelo proposto.

6 REFERÊNCIAS

- ABBONDANZA, M. N. M.; SOUZA, R. G. Estimating the generation of household e-waste in municipalities using primary data from surveys: A case study of Sao Jose dos Campos, Brazil. **Waste Management**, v. 85, p. 374–384, 2019.
- ABDI. Logística Reversa de Equipamentos Eletroeletrônicos: Análise de Viabilidade Técnica e Econômica. **Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial - ABDI**, p. 177, 2013.
- ABES. Saneamento Ambiental e Saúde do Catador de Material Reciclável. **Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária. Vários Autores**. São Paulo: Limiar, ISBN 978-85-88075-73-3. 2018. https://www.abes-sp.org.br/arquivos/livro_saneamento-e-saude-catador-material-reciclavel-versao_final_bx.pdf (accessed 09 December 2021).
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE**. ISSN 2179-8303, Brasil, 2019. <https://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/> (accessed 09 December 2021).
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE**. Brasil, 2020. <https://abrelpe.org.br/panorama-2020/> (accessed 09 December 2021).
- ACHILLAS, C. et al. Decision support system for the optimal location of electrical and electronic waste treatment plants: A case study in Greece. **Waste Management**, v. 30, n. 5, p. 870–879, 2010.
- ACHILLAS, C. et al. A multi-objective decision-making model to select waste electrical and electronic equipment transportation media. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 66, p. 76–84, 2012.
- AGRAWAL, S.; SINGH, R. K.; MURTAZA, Q. Prioritizing critical success factors for reverse logistics implementation using fuzzy-TOPSIS methodology. **Journal of Industrial Engineering International**, v. 12, n. 1, p. 15–27, 2016.
- AKCIL, A. et al. Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants--A review. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 45, p. 258–271, 2015.
- ALMEIDA, A. T. Processo de Decisão nas Organizações. p. 256, 2013.
- ALMEIDA, A. T. DE et al. **Multicriteria and Multiobjective Models for Risk**,

Reliability and Maintenance Decision Analysis. [s.l: s.n.]. v. 231

AZEVEDO, L. P. et al. E-waste management and sustainability: a case study in Brazil.

Environmental Science and Pollution Research, v. 24, n. 32, p. 25221–25232, 2017.

BABU, B. R.; PARANDE, A. K.; BASHA, C. A. Electrical and electronic waste: A global environmental problem. **Waste Management and Research**, v. 25, n. 4, p. 307–318, 2007.

BACHÉR, J.; MROTZEK, A.; WAHLSTRÖM, M. Mechanical pre-treatment of mobile phones and its effect on the Printed Circuit Assemblies (PCAs). **Waste Management**, v. 45, n. 3, p. 235–245, 2015.

BALDE, C. P. et al. **E-waste statistics: Guidelines on classification, reporting and indicators 2015**. Bonn, Germany: United Nations University, IAS - SCYCLE, 2015.

BALDE, C. P. et al. **The global e-waste monitor 2017**. [s.l: s.n.].

BARROS, G. M. M.; PEREIRA, V.; ROBOREDO, M. C. ELECTRE tree: a machine learning approach to infer ELECTRE Tri-B parameters. **Data Technologies and Applications**, v. 55 No.4, n. Emerald Publishing Limited, 2021.

BILUCA, J.; AGUIAR, C. R.; TROJAN, F. Sorting of suitable areas for disposal of construction and demolition waste using GIS and ELECTRE TRI. **Waste Management**, v. 114, p. 307–320, 2020.

BOGGIA, A.; CORTINA, C. Measuring sustainable development using a multi-criteria model: A case study. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 11, p. 2301–2306, 2010.

BRASIL. Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.

Legislação brasileira. Brasil 2010. http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm (accessed 09 December 2021).

BRASIL. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2018. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS)**. Brasil, 2019.

<http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-residuos-solidos/diagnostico-do-manejo-de-residuos-solidos-urbanos-2018> (accessed 09 December 2021).

BRASIL. Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020. Regulamenta o inciso VI do caput do art.33 e o art.56 da Lei nº12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação de sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes. **Legislação brasileira.** Brasil 2020.

<https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/2020/decreto-10240-12-fevereiro-2020-789763-publicacaooriginal-160002-pe.html> (accessed 09 December 2021).

BRITO, A. J.; ALMEIDA, A. T.; MOTA, C. M. M. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. **European Journal of Operational Research**, v. 200, n. 3, p. 812–821, 2010.

BRONIEWICZ, E.; OGRODNIK, K. Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 83, n. April, p. 102351, 2020.

CAMPOS, H. K. T. Recycling in Brazil: Challenges and prospects. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 85, p. 130–138, 2014.

CATAFORTE. Manual de Orientação Tributária destinado às Associações e Cooperativas de Catadoras e Catadores de Materiais Recicláveis. **Fortalecimento do Associativismo e Cooperativismo dos Catadores de Materiais Recicláveis - Negócios Sustentáveis em Redes Solidárias**. São Paulo, 2015. <http://www.ceadec.org.br/arquivos/publicacoes-6--4Manual%20de%20Orienta%C3%A7%C3%A3o%20Tribut%C3%A1ria%20Plano%20Cont%C3%A1bil.pdf> (accessed 09 December 2021).

CEMPRE. Review 2019. **Compromisso Empresarial para Reciclagem**. São Paulo, 2019a. <https://cempre.org.br/cempre-review/> (accessed 09 December 2021).

CEMPRE. Serviços Eletroeletrônicos. **Compromisso Empresarial para Reciclagem**. São Paulo, 2020b. <http://cempre.org.br/servico/eletroeletronicos> (accessed 09 December 2021).

CETESB. Decisão de diretoria N. 120/2016/C, de 01 de junho de 2016. **Diário Oficial do Estado de São Paulo**. Estabelece os “Procedimentos para o licenciamento ambiental de estabelecimentos envolvidos no sistema de logística reversa, para a dispensa do CADRI e para o gerenciamento dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos pós-consumo”, e dá outras providências. São Paulo, 2016. <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2014/12/DD-120-2016-C-010616.pdf> (accessed 09 December 2021).

CHANG, N. BIN; PARVATHINATHAN, G.; BREEDEN, J. B. Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. **Journal of Environmental Management**, v. 87, n. 1, p. 139–153, 2008.

CHAUDHARY, K.; VRAT, P. Optimal location of precious metal extraction facility (PMEF) for E-waste recycling units in National Capital Region (NCR) of India. **Opsearch**, v. 54, n. 3, p. 441–459, 2017.

CINELLI, M.; COLES, S. R.; KIRWAN, K. Analysis of the potentials of multi criteria

- decision analysis methods to conduct sustainability assessment. **Ecological Indicators**, v. COELHO, L. C. Tipos de caminhões (tamanhos e capacidades). **Logística descomplicada**. Brasil, 2010. <https://www.logisticadescomplicada.com/tipos-de-caminhoes-tamanhos-e-capacidades/> (accessed 28 February 2021).
- COSTA, H.; FREITAS, A. Aplicação do método ELECTRE TRI à classificação da satisfação de clientes. **Revista portuguesa e brasileira de gestão**, v. 4, n. 4, p. 66–76, 2005.
- COSTA, H. G. et al. ELECTRE TRI applied to costumers satisfaction evaluation. **Producao**, v. 17, n. 2, p. 230–245, 2007.
- DE ARAÚJO, M. C. B.; ALENCAR, L. H.; MOTA, C. M. DE M. Classification model for bid/no-bid decision in construction projects. **International Transactions in Operational Research**, v. 29, n. 2, p. 1025–1047, 2022.
- DE LUCA, A. I. et al. Life cycle tools combined with multi-criteria and participatory methods for agricultural sustainability: Insights from a systematic and critical review. **Science of the Total Environment**, v. 595, p. 352–370, 2017.
- DE OLIVEIRA, J. D. et al. E-Waste Mistakenly Disposed of as Recyclable Waste: A Case Study from Brazil. **Clean - Soil, Air, Water**, v. 48, n. 11, p. 1–10, 2020.
- DEVA. Como calcular o custo do quilômetro rodado do meu caminhão? **Blog Iveco Deva**, s.d. <https://blog.deva.com.br/como-calcular-o-custo-do-quilometro-rodado-do-meu-caminhao/> (accessed 28 February 2021).
- DIAS, L. et al. An aggregation/disaggregation approach to obtain robust conclusions with ELECTRE TRI. **European Journal of Operational Research**, v. 138, n. 2, p. 332–348, 2002.
- DUFLOU, J. R. et al. Efficiency and feasibility of product disassembly: A case-based study. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 583–600, 2008.
- ELIA, V.; GNONI, M. G.; TORNESE, F. Designing a sustainable dynamic collection service for WEEE: an economic and environmental analysis through simulation. **Waste Management and Research**, v. 37, n. 4, p. 402–411, 2019.
- FENG, D. et al. Pricing decision for reverse logistics system under cross-competitive take-back mode based on game theory. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 24, 2019.
- FERREIRA, V. F. M.; GONÇALVES-DIAS, S. L. F.; VALLIN, I. DE C. Inclusion of waste pickers in the reverse logistics of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) – the case study of Projeto Eco Eletro. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v.

51, p. 263–281, 2019.

FERRI, G. L.; DINIZ CHAVES, G. DE L.; RIBEIRO, G. M. Reverse logistics network for municipal solid waste management: The inclusion of waste pickers as a Brazilian legal requirement. **Waste Management**, v. 40, p. 173–191, 2015.

FORTI, P. V. O crescimento do lixo eletrônico e suas implicações globais. p. 1–20, 2019.

FORTI, V. et al. The Global E-waste Monitor 2020. **United Nations University, United Nations Institute for Training and Research and International Telecommunication Union**. ISBN Digital: 978-92-808-9114-0; ISBN Print: 978-92-808-9115-7. 2020

<https://ewastemonitor.info/gem-2020/> (accessed 09 December 2021).

FUNDAÇÃO AVINA et al. Cooperativas: tributos e benefícios. ISBN: 978-85-66436-02-0. Salvador: Inspirar Ideias, 2013. http://www.pasocierto.com.br/assets/dd8-br_cooperativas-tributos-e-benef%C3%ADcios_brasil.pdf (accessed 09 December 2021).

GHISOLFI, V. et al. System dynamics applied to closed loop supply chains of desktops and laptops in Brazil: A perspective for social inclusion of waste pickers. **Waste Management**, v. 60, p. 14–31, 2017.

GIESE, E. C. et al. **Cooperativas e a gestão de resíduos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: [s.n.].

GOFFI, A. S. et al. Economic feasibility for selecting wastewater treatment systems. **Water Science and Technology**, v. 78, n. 12, p. 2518–2531, 2018.

GOUVEIA, N. et al. Occupational exposure to mercury in recycling cooperatives from the metropolitan region of são paulo, Brazil. **Ciencia e Saude Coletiva**, v. 24, n. 4, p. 1517–1526, 2019.

GRIMES, S. M.; MAGUIRE, D. Assessment of priorities in critical material recovery from Waste Electrical and Electronic Equipment. **Resources Policy**, v. 68, n. May, p. 101658, 2020.

GUARNIERI, P.; 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**, v. 133, p. 1105–1117, 2016.

GUIA TRABALHISTA, E. **Cálculos de encargos sociais e trabalhistas**. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/tematicas/custostrabalhistas.htm>>. Acesso em: 4 jan. 2021.

GUTBERLET, J. Cooperative urban mining in Brazil: Collective practices in selective household waste collection and recycling. **Waste Management**, v. 45, p. 22–31, 2015.

ILO. **Tackling informality in e-waste management: The potential of cooperative enterprises**. Geneva: [s.n.].

ISMAIL, H.; HANAFIAH, M. M. **A review of sustainable e-waste generation and management: Present and future perspectives***Journal of Environmental Management*, 2020.

ISTRATE, E. et al. Extraction and separation of nonferrous and precious metals from waste of electrical and electronic equipment through ferric sulfate leaching and electrolysis. **Journal of Chemical Technology and Biotechnology**, v. 93, n. 10, p. 2878–2886, 2018.

JATO-ESPINO, D. et al. A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. **Automation in Construction**, v. 45, p. 151–162, 2014.

JAUNICH, M. K. et al. Life-cycle modeling framework for electronic waste recovery and recycling processes. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 161, n. March, p. 104841, 2020.

JOERIN, F.; THÉRIALULT, M.; MUSY, A. Using GIS and outranking multicriteria analysis for land-use suitability assessment. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 15, n. 2, p. 153–174, 2001.

JU, Y. et al. A new framework for health-care waste disposal alternative selection under multi-granular linguistic distribution assessment environment. **Computers and Industrial Engineering**, v. 145, n. May, p. 106489, 2020.

LAI, E.; LUNDIE, S.; ASHBOLT, N. J. Review of multi-criteria decision aid for integrated sustainability assessment of urban water systems. **Urban Water Journal**, v. 5, n. 4, p. 315–327, 2008.

LIMA, E. C. P.; ALMEIDA, J. A.; ALMEIDA, A. T. **MODELO MULTICRITÉRIO PARA SELEÇÃO DE PROJETOS EM UMA EMPRESA DE SERVIÇOS DE CONSULTORIA**XXX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO São Carlos, 2010.

MENDAS, A.; DELALI, A. Integration of MultiCriteria Decision Analysis in GIS to develop land suitability for agriculture: Application to durum wheat cultivation in the region of Mleta in Algeria. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 83, p. 117–126, 2012.

MMA. Ministério do Meio Ambiente celebra Acordo Setorial de Eletroeletrônicos. **Ministério do Meio Ambiente**. <https://www.mma.gov.br/informma/item/15652->

- ministério-do-meio-ambiente-celebra-acordo-setorial-de-eletroeletrônicos.html (accessed 01 April 2020).
- MMA. Logística reversa deve aumentar de 70 para mais de 5 mil pontos de coleta de lixo eletroeletrônico no país. **Ministério do Meio Ambiente**. <https://www.mma.gov.br/informma/item/15702-logística-reversa-deve-aumentar-de-70-para-mais-de-5-mil-pontos-de-coleta-de-lixo-eletroeletrônico-no-país.html> (accessed 30 March 2020).
- MNCR. Classificação Brasileira de Ocupações. **Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis**. 2020. <http://www.mncr.org.br/biblioteca/legislacao/classificacao-brasileira-de-ocupacoes-cbo> (accessed 5 August 2020).
- MNCR. Quantos Catadores existem em atividade no Brasil? **Movimento Nacional dos Catadores de Materiais Recicláveis**. 2020. <http://beta.mncr.org.br:8080/site/sobre-o-mncr/duvidas-frequentes> (accessed 09 September 2020).
- MOI, P. C. P. et al. Lixo Eletrônico: Consequências E Possíveis Soluções. **Connection Line - Revista Eletrônica Do Univag**, v. 0, n. 7, p. 37–45, 2012.
- MONTEIRO, R. L. DO C.; PEREIRA, V.; COSTA, H. G. A Multicriteria Approach to the Human Development Index Classification. **Social Indicators Research**, v. 136, n. 2, p. 417–438, 2018.
- MONTIBELLER, G.; BELTON, V. Causal maps and the evaluation of decision options - A review. **Journal of the Operational Research Society**, v. 57, n. 7, p. 779–791, 2006.
- MOSTAFA, T. M.; SARHAN, D. S. Economic feasibility study of E-waste recycling facility in Egypt. **Evergreen**, v. 5, n. 2, p. 26–35, 2018.
- MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R. Inferring an ELECTRE TRI Model from Assignment Examples. **Journal of Global Optimization**, v. 12, n. 2, p. 157–174, 1998.
- MOUSSEAU, V.; SLOWINSKI, R.; ZIELNIEWICZ, P. A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support. **Computers and Operations Research**, v. 27, n. 7–8, p. 757–777, 2000.
- MTE. Classificação Brasileira de Ocupações. **Ministério do Trabalho**. <http://www.mtecbo.gov.br/cbsite/pages/pesquisas/BuscaPorTituloResultado.jsf> (accessed 5 August 2020).
- NOWAKOWSKI, P.; KRÓL, A.; MRÓWCZYŃSKA, B. Supporting mobile WEEE collection on demand: A method for multi-criteria vehicle routing, loading and cost optimisation. **Waste Management**, v. 69, n. 2017, p. 377–392, 2017.

- OLIVEIRA, C. M. et al. Anuário da Reciclagem 2020. Brasil, 2020. **Ancat, LCA e Pragma Soluções Sustentáveis**. <http://anuariodareciclagem.eco.br/interna> (accessed 09 December 2021).
- OLIVEIRA, C. R. DE; BERNARDES, A. M.; GERBASE, A. E. Collection and recycling of electronic scrap: A worldwide overview and comparison with the Brazilian situation. **Waste Management**, v. 32, n. 8, p. 1592–1610, 2012.
- OTTONI, M.; DIAS, P.; XAVIER, L. H. A circular approach to the e-waste valorization through urban mining in Rio de Janeiro, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 261, p. 120990, 2020.
- PARNELL, G. S.; TRAINOR, T. E. Using the swing weight matrix to weight multiple objectives. **19th Annual International Symposium of the International Council on Systems Engineering, INCOSE 2009**, v. 1, n. July, p. 283–298, 2009.
- PINHEL, J. R. Do lixo à cidadania: Guia para a Formação de Cooperativas de Catadores de Materiais Recicláveis. **Peirópolis e IPESA - Instituto de Projetos e Pesquisas Socioambientais**. Brasil, 2013.
- <https://www.ipesa.org.br/arquivos/DOLIXOACIDADANIA.pdf> (accessed 09 December 2021).
- RODRIGUES, E.; MONDELLI, G. Assessment of integrated MSW management using multicriteria analysis in São Paulo City. **International Journal of Environmental Science and Technology**, n. 2011, 2021.
- ROMERO-ANIA, A.; GUTIÉRREZ, L. R.; OLIVA, M. A. DE V. Multiple criteria decision analysis of sustainable urban public transport systems. **Mathematics**, v. 9, n. 16, p. 1–30, 2021.
- SAHAJWALLA, V.; HOSSAIN, R. The science of microrecycling: a review of selective synthesis of materials from electronic waste. **Materials Today Sustainability**, v. 9, p. 100040, 2020.
- SÁNCHEZ-LOZANO, J. M. et al. GIS-based photovoltaic solar farms site selection using ELECTRE-TRI: Evaluating the case for Torre Pacheco, Murcia, Southeast of Spain. **Renewable Energy**, v. 66, p. 478–494, 2014.
- SANTOS, P. G. DOS. **MODELO DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO PARA CLASSIFICAÇÃO DE FORNECEDORES EM NÍVEIS DE COLABORAÇÃO NO GERENCIAMENTO DA CADEIA DE SUPRIMENTOS UTILIZANDO O MÉTODO ELECTRE TRI**. [s.l.] Universidade Federal de Pernambuco, 2012.

- SCHLUEP, M. et al. Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies. Recycling – From E- Waste To Resources. **UNEP - StEP**, p. 1–120, 2009.
- SHAHNAZARI, A. et al. Identification of effective factors to select energy recovery technologies from municipal solid waste using multi-criteria decision making (MCDM): A review of thermochemical technologies. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 40, n. May, 2020.
- SHOKOUHYAR, S.; AALIREZAEI, A. Designing a sustainable recovery network for waste from electrical and electronic equipment using a genetic algorithm. **International Journal of Environment and Sustainable Development**, v. 16, n. 1, p. 60–79, 2017.
- SINIR. Sistemas de logística reversa de produtos eletroeletrônicos de uso doméstico e seus componentes. **Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos Sólidos**. <https://sinir.gov.br/component/content/article/63-logistica-reversa/474-acordo-setorial-de-eletronicos> (accessed 12 April 2020).
- SMA. Termo de compromisso para responsabilidade pós-consumo de pilhas e baterias portáteis. **Secretaria de Meio Ambiente**. São Paulo, 2012. <https://cetesb.sp.gov.br/logisticareversa/wp-content/uploads/sites/27/2017/11/fase1-tc-PilhasBaterias.pdf> (accessed 09 December 2021).
- SOUZA, R. G. et al. Definition of sustainability impact categories based on stakeholder perspectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 105, p. 41–51, 2015a.
- SOUZA, R. G. et al. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, v. 57, p. 46–56, 2016.
- SOUZA, R. G. E-waste situation and current practices in Brazil. In: **Handbook of Electronic Waste Management**. [s.l.] INC, 2020. p. 377–396.
- SPITZBART, M. Business Plan Calculation Tool for Manual Dismantling Facilities. **D.R.Z - Dismatling and Recycling Centre**. Vienna, 2016. https://www.resource-recovery.net/sites/default/files/ewam-2016_6c_spitzbart_calculation-tool.pdf (accessed 09 December 2021).
- SPITZBART, M.; HERBECK, E.; SCHLUEP, M. Business Plan Calculation Tool for Manual Dismantling Facilities. **Step Green Paper**, United Nations University and Step Initiative, 2016. https://www.step-initiative.org/files/_documents/green_papers/Step_GP_BCT_final.pdf (accessed 09 December 2021).
- UNIDO. Economic Feasibility of e-waste treatment in Tanzania. 2012. **United Nations**

Industrial Development Organization.

<https://open.unido.org/api/documents/4784290/download/Economic%20Feasibility%20of%20e-Waste%20Treatment%20in%20Tanzania> (accessed 09 December 2021).

UNIDO. e-waste Treatment Facility in Uganda: Economic Feasibility Study. 2014. **United Nations Industrial Development Organization.**

<https://open.unido.org/api/documents/4784194/download/e-Waste%20Treatment%20Facility%20in%20Uganda%20-%20Economic%20Feasibility%20Study> (accessed 09 December 2021).

<http://www.ewasteguide.info/files/Blaser_2012_UNIDO-Empa.pdf>.

UNIDO. **e-waste Treatment Facility in Uganda: Economic Feasibility Study** UNITED NATIONS INDUSTRIAL DEVELOPMENT ORGANIZATION. [s.l: s.n.].

URBAM. Estudo de Caracterização Gravimétrica São José dos Campos – SP Setembro - 2018. 2018.

VALENTE, D. B. et al. Economic analysis of waste electrical and electronic equipment management: a study involving recycling cooperatives in Brazil. **Environment, Development and Sustainability**, n. 0123456789, 2021.

VIEIRA, B. D. O. et al. Prioritizing barriers to be solved to the implementation of reverse logistics of e-waste in Brazil under a multicriteria decision aid approach. **Sustainability (Switzerland)**, v. 12, n. 10, 2020.

VIVAS, R. et al. Measuring sustainability performance with multi criteria model: A case study. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 21, p. 1–13, 2019.

WANG, S.; LI, W. D.; XIA, K. Customized disassembly and processing of waste electrical and electronic equipment. **Manufacturing Letters**, v. 9, p. 7–10, 2016.

WIBOWO, S.; DENG, H. Multi-criteria group decision making for evaluating the performance of e-waste recycling programs under uncertainty. **Waste Management**, v. 40, p. 127–135, 2015.

7 APÊNDICES

Apêndice A: Dados de REEE em São José dos Campos/SP.

Composição dos REEE	Composição (%)	Quantidade (t/ano)
SHA kitchen (coffee machine)	0	0
SHA cloths (iron)	0	0
PC/Server	6,1	59
Notebook	9,2	88
Printer/Scanner/Copier	7,2	69
IT accessories (mix keyboard, mouse)	0,2	2
Mobile phone (incl. Recharger)	5,3	51
CRT monitor	0	0
FPD monitor	0	0
Audio appliances (CD-/Radiorecorder)	0	0
Video appliances (CD-/DVD-Playes)	0	0
CRT TV	52,7	506
FPD TV	19,3	185
Total	100	960*

*Este valor não considera grandes eletrodomésticos.

Apêndice B: Valores de mercado para os materiais de REEE levantados em São José dos Campos.

Material	Empresa 1 (R\$)	Empresa 2 (R\$)	Empresa 3 (R\$)	Empresa 4 (R\$)	Empresa 5 (R\$)	Valor selecionado (R\$)
Alumínio	3.500	2.000	-	1.750	5.000	5.000
Sucata (Ferro/Aço)	700	700	-	450	750	750
Cobre	22.667	32.000	-	25.000	36.000	36.000
Imã (de Neodímio)	-	-	-	-	750	750
Bronze/Latão	15.000	-	-	12.460	15.400	15.400
Aço inox	4.000	-	-	-	4.000	4.000
Plásticos	-	1.070	-	50	800	1.070
Madeira	-	-	-	-	-	-
Cabos com plugs	500	4.500	-	-	-	4.500
Cabos sem plugs	1.500	4.000	-	-	-	4.000
Processadores	12.000	500.000	237.778	300.000	10.000	500.000
HD com placa	2.800	4.000	6.000	5.000	-	6.000
HD sem placa	2.800	-	-	1.000	-	2.800
Fontes de alimentação	700	100.000	1.000	1.230	-	100.000
Drives	-	-	200	700	-	700
Placas verde/dourado	12.000	40.000	60.000	60.500	20.000	60.500
Placas verde/verde	700	26.000	-	-	15.000	26.000
Placas marrom (podre)	700	2.000	1.800	2.200	1.500	2.200
Celulares sem bateria	15.000	238.000	32.250	30.000	4.000	238.000
Motor/Indutos/Transformador	500	-	-	1.110	-	1.110
Yoke	-	-	-	-	-	-

Canhão de elétrons	-	-	-	-	-510	-510
Sucata mista	700	700	-	-	-510	700
Vidro	-	-	-	-	-20	-
Rejeitos (ex. sujos)	-	-	-	-	-	-
Baterias	3.500	-	-	-	-3.000	3.500
Capacitores	-	-	-	-	-	-
Telas LCD	-	-	-	-	-510	-510
Lâmpadas fluorescentes	-	-	-	-	-5.800	-5.800
Cartuchos de impressora	-	-	-	-	-2.000	-2.000
Tubos CRT (fundo)	-	-	-	1.000	-510	1.000
Vidros CRT (frente)	-	-	-	-	-510	-510
Camada Fósforo - CRT	-	-	-	-	-510	-510

*Os valores com sinal de negativo representam que esse valor é uma despesa para a empresa e no cálculo são consideradas como tal.

**O traço (-) no restante dos valores da tabela indica que as empresas não souberam informar o valor de mercado do material.

Apêndice C: Dados sobre custo de transporte.

Distância	Custos de transporte	Situação
Transporte local	R\$8	0-5km
Transporte regional	R\$304	5-500km
Transporte de longa distância	R\$810	>500km
Transporte marítimo	-	-

*Cálculo do custo: combustível (2,5km/L e R\$3,62/l) + pedágio.

Apêndice D: Dados para o quadro de funcionários.

Funcionários	Salário cooperativas	Salários empresas	Quantidade	Base de cálculo
Diretor Geral	R\$1045	R\$12433	1	
Gerente de Departamento	R\$1045	R\$6409	1	por 25 trabalhadores de desmontagem
Trabalhador qualificado	R\$1045	R\$1396	10%	de todos funcionários
Trabalhador não qualificado	R\$1045	R\$1045	90%	de todos funcionários
Funcionários Administrativos	R\$1045	R\$3822	10%	de todos funcionários
Número de salários por ano	12	12		
Custos trabalhistas não salariais + Encargos trabalhistas e sociais	23%	67%		
Horas de trabalho por dia	8	8		
Dias de trabalho por ano	253	253		

Apêndice E: Dados sobre manutenção da infraestrutura e equipamentos.

Manutenção	Custos específicos	Base de cálculo
Prédio	0	por m ²
Equipamento	20%	do custo de investimento
Administrativo	0	por funcionário administrativo
Treinamento*	0	por empregado
Outros**	R\$34500	total por ano

*Maioria dos treinamentos tem subsídios de empresas e da prefeitura.

**Valor referente ao IPTU, seguro, treinamentos, gastos administrativos e manutenção.

Apêndice F: Dados sobre aquisição de equipamentos e maquinário.

Equipamentos	R\$/ unidade	Vida útil (a)	Quantidades
Estação de desmontagem (mesa, cadeira)	R\$ 1.100,13	10	1
Setor Administrativo (PC, mesa, cadeira)	R\$ 3.468,91	5	1
Ferramentas (parafusadeira com kit chave de fenda, martelo, alicate, alicate de corte, tesoura, estilete, espátula, machadinha)	R\$ 439,69	1	1
EPI (sapatos, capacete, luvas, óculos, auricular, macacão)	R\$ 258,30	1	1
Ventilador	R\$ 687,90	10	1
Caixa organizadora	R\$ 1,04	15	10
Palete	R\$ 29,90	10	5
Balança	R\$ 1.098,00	20	1
Paleteira	R\$ 1.365,00	20	4
Rack para transporte	R\$ 1.888,00	25	0
Empilhadeira	R\$ 31.104,00	20	0
Unidade de tratamento de CRT	R\$ 135.000,00	25	1

Apêndice G: Dados sobre o imóvel.

Infraestrutura	Custo compra (R\$/m²)	Custo aluguel (R\$/m²)	Espaço (m²)	Base de cálculo
Imóvel	2400	12	hall+1m ²	por 1t/a de entrada
Departamento administrativo	2400	12	15	por funcionário administrativo
Área de lazer e sanitários	2400	12	3	pelo total de funcionários
Estações de desmontagem	2400	12	55	por total de funcionário de desmontagem
Área de recebimento de WEEE	2400	12	20	por funcionário
Área para tratamento	2400	12	20	por unidade de tratamento
Estoque	2400	12	1	por 1t/a de entrada

Apêndice H: Regime tributário aplicado às cooperativas.

Tributação	Lucro Real (LR)	Lucro Presumido (LP)
Imposto de Renda (IR)	Incide sobre o as receitas e despesas. Alíquotas de 15% + 10% sobre a parcela que exceder R\$20.000 por mês	Varia de 8% para vendas de bens e 32% para prestação de serviços. Alíquotas de 15% + 10% sobre a parcela que exceder R\$20.000 por mês.
Contribuição Social Sobre o Lucro (CSLL)	Incide sobre o as receitas e despesas. Alíquota de 9%.	Varia de 8, 12 ou 32%, de acordo com a atividade. Alíquota de 9%.
Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI)*	Alíquotas variam de acordo com o produto a ser vendido.	Alíquotas variam de acordo com o produto a ser vendido.

Imposto sobre Serviços (ISS)	Cobrado pelo Município. Incide sobre o valor total do serviço prestado pela cooperativa a terceiros. Alíquota entre 2 e 5%.	Cobrado pelo Município. Incide sobre o valor total do serviço prestado pela cooperativa a terceiros. Alíquota entre 2 e 5%.
Programa de Integração Social (PIS)**	Alíquota de 0,65%.	Alíquota de 0,65%.
Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS)	Alíquota de 3%.	Alíquota de 3%.
Imposto sobre a Circulação de Mercadorias (ICMS)	Cobrado pelo Estado. Alíquotas variam entre 17 e 18%, de acordo com o Estado e atividade.	Cobrado pelo Estado. Alíquotas variam entre 17 e 18%, de acordo com o Estado e atividade.
Contribuição Previdenciária (INSS)***	Alíquota de 11% sobre a remuneração dos cooperados, sendo a cooperativa responsável por reter esse tributo.	Alíquota de 11% sobre a remuneração dos cooperados, sendo a cooperativa responsável por reter esse tributo.

*As cooperativas somente pagarão esse imposto se forem estabelecimentos industriais.

**Incide 1% sobre a folha de salários das cooperativas que realizam somente atos cooperativos.

***INSS Patronal é pago pelas empresas que contratam serviços das cooperativas e incidem 15% do valor bruto da nota de serviço.

Fonte: CATAFORTE, 2015; FUNDAÇÃO AVINA et al., 2013.

Apêndice I: Desempenho dos 34 cenários que processam 100% dos REEE após aplicação da ferramenta StEP.

Cenário	Nível	Custos de investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Trabalhadores (pessoas)	Área Total (m ²)	Custos com trabalhadores (R\$/ano)
C1	A	-46.218	1.492.889	8	2.353	-123.394
	B	-77.081	3.062.377	19	3.088	-293.060
	C	-258.153	2.456.277	35	4.149	-539.847
C2	A	-46.218	1.493.657	8	2.353	-123.394
	B	-77.081	3.063.145	19	3.088	-293.060
	C	-258.153	2.457.045	35	4.149	-539.847
C3	A	-46.218	1.494.425	8	2.353	-123.394
	B	-77.081	3.063.913	19	3.088	-293.060
	C	-258.153	2.457.813	35	4.149	-539.847
C4	A	-46.218	1.495.193	8	2.353	-123.394
	B	-77.081	3.064.681	19	3.088	-293.060
	C	-258.153	2.458.581	35	4.149	-539.847
C5	A	-46.218	1.496.729	8	2.353	-123.394
	B	-77.081	3.066.217	19	3.088	-293.060
	C	-258.153	2.460.117	35	4.149	-539.847
C6	A	-46.218	1.500.569	8	2.353	-123.394
	B	-77.081	3.070.057	19	3.088	-293.060
	C	-258.153	2.463.957	35	4.149	-539.847
C7-10	A	-57.667	1.417.550	10	2.409	-154.242
	B	-88.530	2.986.509	21	3.145	-323.908
	C	-411.864	2.322.365	39	4.315	-601.543
C8-11	A	-57.667	1.417.932	10	2.409	-154.242

	B	-88.530	2.804.568	21	3.145	-326.909
	C	-403.118	2.356.231	37	4.279	-570.695
C9-12	A	-53.834	1.348.566	9	2.163	-138.818
	B	-75.026	2.297.152	17	2.737	-262.212
	C	-380.742	1.310.147	29	3.530	-447.302
C13	A	-63.324	1.390.332	12	2.498	-185.090
	B	-89.814	2.976.846	22	3.216	-339.332
	C	-406.126	2.343.736	38	4.296	-586.120
C14	A	-67.392	1.354.866	12	2.520	-185.091
	B	-104.352	2.906.991	24	3.219	-370.182
	C	-549.807	2.264.235	39	4.356	-601.545
C15	A	-80.044	1.253.324	16	2.720	-246.788
	B	-118.728	2.805.116	28	3.364	-431.876
	C	-702.072	2.118.656	44	4.592	-678.664
C16	A	-83.545	1.234.225	15	2.560	-231.365
	B	-131.900	2.735.605	30	3.365	-462.725
	C	-847.835	2.038.825	45	4.545	-694.090
C17	A	-97.644	1.148.352	18	2.688	-277.638
	B	-155.670	2.599.320	36	3.654	-555.270
	C	-998.898	1.925.610	48	4.638	-740.364
C18	A	-3.372.105	1.451.553	8	2.353	-123.394
	B	-5.159.342	2.950.786	19	3.088	-293.060
	C	-7.872.888	2.243.387	35	4.149	-539.847
C19	A	-3.372.105	1.452.321	8	2.353	-123.394
	B	-5.159.342	2.951.554	19	3.088	-293.060
	C	-7.872.888	2.244.155	35	4.149	-539.847
C20	A	-3.372.105	1.453.089	8	2.353	-123.394
	B	-5.159.342	2.952.322	19	3.088	-293.060
	C	-7.872.888	2.244.923	35	4.149	-539.847
C21	A	-3.372.105	1.453.857	8	2.353	-123.394
	B	-5.159.342	2.953.090	19	3.088	-293.060
	C	-7.872.888	2.245.691	35	4.149	-539.847
C22	A	-3.372.105	1.455.393	8	2.353	-123.394
	B	-5.159.342	2.954.626	19	3.088	-293.060
	C	-7.872.888	2.247.227	35	4.149	-539.847
C23	A	-3.372.105	1.459.233	8	2.353	-123.394
	B	-5.159.342	2.958.466	19	3.088	-293.060
	C	-7.872.888	2.251.067	35	4.149	-539.847
C24-27	A	-3.517.282	1.370.864	10	2.409	-154.242
	B	-5.304.519	2.879.569	21	3.145	-323.908
	C	-8.422.410	2.093.642	39	4.315	-601.543
C25-28	A	-3.517.282	1.371.247	10	2.409	-154.242
	B	-5.304.519	2.869.628	21	3.145	-323.909
	C	-8.327.696	2.130.947	37	4.279	-570.695
C26-29	A	-3.134.354	1.308.734	9	2.163	-138.818
	B	-4.526.258	2.202.492	17	2.737	-262.212
	C	-6.726.852	1.139.691	29	3.530	-447.302
C30	A	-3.737.262	1.335.072	12	2.498	-185.090
	B	-5.477.142	2.853.052	22	3.216	-339.332
	C	-8.373.688	2.116.734	38	4.296	-586.120
C31	A	-3.789.090	1.297.695	12	2.520	-185.091
	B	-5.497.053	2.782.983	24	3.219	-370.182

	C	-3.208.611	882.825	39	4.356	-185.091
C32	A	-5.859.480	2.667.188	16	2.720	-431.876
	B	-9.375.288	1.863.428	28	3.360	-678.664
	C	-9.943.572	2.440.532	44	4.592	-61.696
C33	A	-3.901.360	1.173.210	15	2.560	-231.365
	B	-5.878.025	2.597.460	30	3.365	-462.725
	C	-9.402.845	1.788.325	45	4.545	-694.090
C34	A	-4.220.526	1.075.134	18	2.688	-277.638
	B	-6.592.524	2.433.546	36	3.654	-555.270
	C	-9.778.380	1.666.128	48	4.638	-740.364

Apêndice J: Resultado da análise de sensibilidade para redução de 50% da quantidade de REEE processados pela cooperativa.

Cenário	Nível	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m²)	Custos com Funcionários (R\$/ano)
C1	A	-31.662	695.166	6	1.249	-92.454
	B	-44.907	1.488.423	11	1.608	-168.666
	C	-203.063	1.171.868	19	2.148	-293.060
C2	A	-31.662	695.550	6	1.249	-92.454
	B	-44.907	1.488.807	11	1.608	-168.666
	C	-203.063	1.172.252	19	2.148	-293.060
C3	A	-31.662	695.934	6	1.249	-92.454
	B	-44.907	1.489.191	11	1.608	-168.666
	C	-203.063	1.172.636	19	2.148	-293.060
C4	A	-31.662	696.318	6	1.249	-92.454
	B	-44.907	1.489.575	11	1.608	-168.666
	C	-203.063	1.173.020	19	2.148	-293.060
C5	A	-31.662	697.086	6	1.249	-92.454
	B	-44.907	1.490.343	11	1.608	-168.666
	C	-203.063	1.173.788	19	2.148	-293.060
C6	A	-31.662	699.006	6	1.249	-92.454
	B	-44.907	1.492.263	11	1.608	-168.666
	C	-203.063	1.175.708	19	2.148	-293.060
C7-10	A	-38.738	639.933	7	1.288	-107.970
	B	-56.356	1.415.900	13	1.664	-200.515
	C	-349.752	1.073.678	21	2.225	-323.908
C8-11	A	-38.752	642.106	7	1.290	-107.970
	B	-60.743	1.404.505	14	1.684	-215.939
	C	-349.766	1.079.001	21	2.227	-323.908
C9-12	A	-38.153	605.070	7	1.202	-107.970
	B	-53.122	1.063.456	12	1.507	-185.091
	C	-336.847	555.664	17	1.906	-262.212
C13	A	-40.022	626.662	8	1.360	-123.394
	B	-59.364	1.402.558	14	1.682	-215.938

	C	-351.036	1.059.328	22	2.296	-339.332
C14	A	-48.822	574.176	9	1.344	-138.819
	B	-77.835	1.299.660	18	1.827	-409.083
	C	-499.449	962.805	24	2.319	-590.271
C15	A	-62.920	488.304	12	1.472	-185.092
	B	-73.516	1.298.256	16	1.760	-246.788
	C	-653.160	832.896	28	2.484	-431.876
C16	A	-77.020	402.430	15	1.600	-231.365
	B	-90.265	1.195.690	20	1.960	-308.485
	C	-801.575	736.375	30	2.505	-462.725
C17	A	-91.116	316.560	18	1.728	-277.638
	B	-107.010	1.093.122	24	2160	-370.182
	C	-960.582	573.078	36	2.814	-555.270
C18	A	-1.868.631	667.536	6	1.249	-92.545
	B	-2.738.571	1.426.526	11	1.608	-169.666
	C	-4.186.844	1.058.367	19	2.148	-293.060
C19	A	-1.868.631	667.920	6	1.249	-92.545
	B	-2.738.571	1.426.910	11	1.608	-169.666
	C	-4.186.844	1.058.751	19	2.148	-293.060
C20	A	-1.868.631	668.304	6	1.249	-92.545
	B	-2.738.571	1.427.294	11	1.608	-169.666
	C	-4.186.844	1.059.135	19	2.148	-293.060
C21	A	-1.868.631	668.688	6	1.249	-92.545
	B	-2.738.571	1.427.678	11	1.608	-169.666
	C	-4.186.844	1.059.519	19	2.148	-293.060
C22	A	-1.868.631	669.456	6	1.249	-92.545
	B	-2.738.571	1.428.446	11	1.608	-169.666
	C	-4.186.844	1.060.287	19	2.148	-293.060
C23	A	-1.868.631	671.376	6	1.249	-92.545
	B	-2.738.571	1.430.366	11	1.608	-169.666
	C	-4.186.844	1.062.207	19	2.148	-293.060
C24-27	A	-1.966.451	608.675	7	1.288	-107.970
	B	-2.883.748	1.348.653	13	1.664	-200.515
	C	-4.515.021	952.916	21	2.225	-323.908
C25-28	A	-1.245.935	247.889	6	762	-92.546
	B	-2.036.601	627.460	9	1.084	-185.090
	C	-3.272.541	375.409	17	1.484	-262.212
C26-29	A	-1.863.182	573.811	7	1.202	-107.970
	B	-2.606.491	1.003.064	12	1.507	-185.091
	C	-3.842.431	457.183	17	1.906	-262.212
C30	A	-2.139.074	588.550	8	1.360	-123.394
	B	-2.929.740	1.333.594	14	1.682	-215.938
	C	-4.687.644	931.714	22	2.296	-339.332

C31	A	-2.110.263	537.567	9	1.344	-138.819
	B	-3.296.262	1.216.773	18	1.827	-277.635
	C	-4.889.190	833.064	24	2.319	-370.182
C32	A	-2.429.428	439.492	12	1.472	-185.092
	B	-3.125.380	1.222.028	16	1.760	-246.788
	C	-5.438.712	687.324	28	2.484	-431.876
C33	A	-2.748.595	341.420	15	1.600	-231.365
	B	-3.618.535	1.100.410	20	1.960	-308.485
	C	-5.640.260	588.675	30	2.505	-462.725
C34	A	-3.067.758	243.342	18	1.728	-277.638
	B	-4.111.626	978.786	24	2.160	-370.182
	C	-6.537.756	395.844	36	2.814	-555.270

Apêndice K: Resultado da análise de sensibilidade para redução de recebimento de 50% de celulares, notebooks e computadores pelas cooperativas.

Cenário	Nível	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m²)	Custos com Funcionários (R\$/ano)
C1	A	-42.223	934.618	7	2.083	-107.969
	B	-58.117	2.044.424	13	2.514	-200.515
	C	-221.571	1.581.522	23	3.197	-354.757
C2	A	-42.223	935.307	7	2.083	-107.969
	B	-58.117	2.045.112	13	2.514	-200.515
	C	-221.571	1.582.211	23	3.197	-354.757
C3	A	-42.223	935.995	7	2.083	-107.969
	B	-58.117	2.045.801	13	2.514	-200.515
	C	-221.571	1.582.900	23	3.197	-354.757
C4	A	-42.223	936.684	7	2.083	-107.969
	B	-58.117	2.046.490	13	2.514	-200.515
	C	-221.571	1.583.589	23	3.197	-354.757
C5	A	-42.223	938.062	7	2.083	-107.969
	B	-58.117	2.047.868	13	2.514	-200.515
	C	-221.571	1.584.966	23	3.197	-354.757
C6	A	-42.223	941.506	7	2.083	-107.969
	B	-58.117	2.051.312	13	2.514	-200.515
	C	-221.571	1.588.410	23	3.197	-354.757
C7-10	A	-53.672	856.707	9	2.139	-138.818
	B	-72.215	1.955.222	16	2.642	-246.787
	C	-372.633	1.465.925	26	3.291	-401.029
C8-11	A	-53.672	863.050	9	2.139	-138.818
	B	-76.588	1.940.246	17	2.659	-262.211
	C	-372.633	1.468.483	26	3.292	-401.029
C9-12	A	-53.087	827.478	9	2.053	-138.818
	B	-66.332	1.619.494	14	2.412	-255.552
	C	-359.728	948.142	22	2.973	-407.225
C13	A	-47.948	882.758	16	2.268	-123.394
	B	-72.588	1.960.222	22	2.698	-246.788
	C	-369.558	1.471.146	34	3.492	-401.030
C14	A	-66.087	782.823	12	2.328	-185.091

	B	-95.100	1.845.012	21	2.811	-323.907
	C	-524.661	1.344.324	30	3.516	-462.726
C15	A	-68.032	741.644	12	2.224	-185.092
	B	-106.716	1.743.848	24	2.868	-370.180
	C	-668.868	1.234.216	32	3.524	-493.576
C16	A	-82.185	658.175	15	2.360	-231.365
	B	-95.430	1.782.725	20	2.720	-308.485
	C	-819.985	1.127.825	35	3.625	-539.845
C17	A	-96.336	576.210	18	2.496	-277.638
	B	-112.230	1.630.476	24	2.928	-370.182
	C	-981.696	958.050	42	4.014	-647.814
C18	A	-2.960.359	900.135	7	2.083	-107.969
	B	-4.004.287	1.968.820	13	2.514	-200.515
	C	-5.800.536	1.440.606	23	3.197	-354.757
C19	A	-2.960.359	900.824	7	2.083	-107.969
	B	-4.004.287	1.969.508	13	2.514	-200.515
	C	-5.800.536	1.441.295	23	3.197	-354.757
C20	A	-2.960.359	901.513	7	2.083	-107.969
	B	-4.004.287	1.970.197	13	2.514	-200.515
	C	-5.800.536	1.441.984	23	3.197	-354.757
C21	A	-2.960.359	902.201	7	2.083	-107.969
	B	-4.004.287	1.970.886	13	2.514	-200.515
	C	-5.800.536	1.442.673	23	3.197	-354.757
C22	A	-2.960.359	903.579	7	2.083	-107.969
	B	-4.004.287	1.972.264	13	2.514	-200.515
	C	-5.800.536	1.444.050	23	3.197	-354.757
C23	A	-2.960.359	907.023	7	2.083	-107.969
	B	-4.004.287	1.975.708	13	2.514	-200.515
	C	-5.800.536	1.447.494	23	3.197	-354.757
C24-27	A	-3.105.536	822.875	9	2.139	-138.818
	B	-4.323.452	1.867.416	16	2.642	-246.787
	C	-6.176.070	1.316.030	26	3.291	-401.029
C25-28	A	-3.105.536	823.218	9	2.139	-138.818
	B	-4.370.809	1.850.720	17	2.659	-262.211
	C	-6.176.070	1.318.588	26	3.292	-401.029
C26-29	A	-3.002.267	787.646	9	2.053	-138.818
	B	-3.872.207	1.545.395	14	2.412	-215.939
	C	-5.503.480	820.528	22	2.973	-339.333
C30	A	-3.059.216	844.646	8	2.124	-123.394
	B	-4.197.858	1.877.550	16	2.590	-246.788
	C	-6.303.738	1.316.118	26	3.348	-401.030
C31	A	-3.558.537	725.655	12	2.328	-185.091
	B	-4.744.536	1.741.563	21	2.811	-323.907
	C	-6.859.428	1.173.462	30	3.516	-462.726
C32	A	-3.332.428	692.832	12	2.224	-185.092
	B	-4.913.760	1.633.332	24	2.868	-370.180
	C	-7.037.664	1.061.228	32	3.524	-493.576
C33	A	-3.661.200	597.160	15	2.360	-231.365
	B	-4.531.140	1.687.445	20	2.720	-308.485
	C	-7.422.805	945.860	35	3.625	-539.845
C34	A	-3.989.970	502.998	18	2.496	-277.638
	B	-5.033.898	1.576.134	24	2.928	-370.182

C	-8.827.896	739.692	42	4.014	-647.814
----------	------------	---------	----	-------	----------

Apêndice L: Pesos definidos pelos stakeholders para os critérios utilizados no estudo.

Crítérios	Importância Custos de Investimento	Importância Resultado operacional	Importância Funcionários	Importância Área
Especialista 1	90	95	100	60
Especialista 2	50	50	50	50
Especialista 3	100	80	70	30
Especialista 4	90	85	100	70
Especialista 5	50	90	90	70
Especialista 6	60	80	100	50
Especialista 7	95	80	90	80
Especialista 8	70	60	100	50
Especialista 9	50	50	0	5
Especialista 10	100	100	100	100
Especialista 11	60	100	80	30
Especialista 12	30	100	100	50
Especialista 13	60	100	90	25
Especialista 14	70	100	90	30
Especialista 15	75	95	90	90
Especialista 16	90	100	80	50
Especialista 17	80	80	100	50
Especialista 18	5	15	50	25
Especialista 19	70	90	100	50
Especialista 20	90	95	70	80
Conversão de pesos de 0 a 1				
Média	0,69	0,82	0,83	0,52
Moda	0,90	1,00	1,00	0,50
Mediana	0,70	0,90	0,90	0,50

Apêndice M: Alternativas com valores normalizados gerados através da ferramenta StEP.

COOPERATIVAS			g1	g2	g3	g4
ID J-ELECTRE	Alternativas	Nível	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m²)
a1	C1	A	-46.218	1.492.889	8	2.353
a2	C1	B	-77.081	3.062.377	19	3.088
a3	C1	C	-258.153	2.456.277	35	4.149
a4	C2	A	-46.218	1.493.657	8	2.353
a5	C2	B	-77.081	3.063.145	19	3.088
a6	C2	C	-258.153	2.457.045	35	4.149
a7	C3	A	-46.218	1.494.425	8	2.353
a8	C3	B	-77.081	3.063.913	19	3.088
a9	C3	C	-258.153	2.457.813	35	4.149
a10	C4	A	-46.218	1.495.193	8	2.353

a11	C4	B	-77.081	3.064.681	19	3.088
a12	C4	C	-258.153	2.458.581	35	4.149
a13	C5	A	-46.218	1.496.729	8	2.353
a14	C5	B	-77.081	3.066.217	19	3.088
a15	C5	C	-258.153	2.460.117	35	4.149
a16	C6	A	-46.218	1.500.569	8	2.353
a17	C6	B	-77.081	3.070.057	19	3.088
a18	C6	C	-258.153	2.463.957	35	4.149
a19	C7-C10	A	-57.667	1.417.550	10	2.409
a20	C7-C10	B	-88.530	2.986.509	21	3.145
a21	C7-C10	C	-411.864	2.322.365	39	4.315
a22	C8-C11	A	-57.667	1.417.932	10	2.409
a23	C8-C11	B	-88.530	2.804.568	21	3.145
a24	C8-C11	C	-403.118	2.356.231	37	4.279
a25	C9-C12	A	-53.834	1.348.566	9	2.163
a26	C9-C12	B	-75.026	2.297.152	17	2.737
a27	C9-C12	C	-380.742	1.310.147	29	3.530
a28	C13	A	-63.324	1.390.332	12	2.498
a29	C13	B	-89.814	2.976.846	22	3.216
a30	C13	C	-406.126	2.343.736	38	4.296
a31	C14	A	-67.392	1.354.866	12	2.520
a32	C14	B	-104.352	2.906.991	24	3.219
a33	C14	C	-549.807	2.264.235	39	4.356
a34	C15	A	-80.044	1.253.324	16	2.720
a35	C15	B	-118.728	2.805.116	28	3.364
a36	C15	C	-702.072	2.118.656	44	4.592
a37	C16	A	-83.545	1.234.225	15	2.560
a38	C16	B	-131.900	2.735.605	30	3.365
a39	C16	C	-847.835	2.038.825	45	4.545
a40	C17	A	-97.644	1.148.352	18	2.688
a41	C17	B	-155.670	2.599.320	36	3.654
a42	C17	C	-998.898	1.925.610	48	4.638
a43	C18	A	-3.372.105	1.451.553	8	2.353
a44	C18	B	-5.159.342	2.950.786	19	3.088
a45	C18	C	-7.872.888	2.243.387	35	4.149
a46	C19	A	-3.372.105	1.452.321	8	2.353
a47	C19	B	-5.159.342	2.951.554	19	3.088
a48	C19	C	-7.872.888	2.244.155	35	4.149
a49	C20	A	-3.372.105	1.453.089	8	2.353
a50	C20	B	-5.159.342	2.952.322	19	3.088
a51	C20	C	-7.872.888	2.244.923	35	4.149
a52	C21	A	-3.372.105	1.453.857	8	2.353
a53	C21	B	-5.159.342	2.953.090	19	3.088
a54	C21	C	-7.872.888	2.245.691	35	4.149
a55	C22	A	-3.372.105	1.455.393	8	2.353
a56	C22	B	-5.159.342	2.954.626	19	3.088

a57	C22	C	-7.872.888	2.247.227	35	4.149
a58	C23	A	-3.372.105	1.459.233	8	2.353
a59	C23	B	-5.159.342	2.958.466	19	3.088
a60	C23	C	-7.872.888	2.251.067	35	4.149
a61	C24-C27	A	-3.517.282	1.370.864	10	2.409
a62	C24-C27	B	-5.304.519	2.879.569	21	3.145
a63	C24-C27	C	-8.422.410	2.093.642	39	4.315
a64	C25-C28	A	-3.517.282	1.371.247	10	2.409
a65	C25-C28	B	-5.304.519	2.869.628	21	3.145
a66	C25-C28	C	-8.327.696	2.130.947	37	4.279
a67	C26-C29	A	-3.134.354	1.308.734	9	2.163
a68	C26-C29	B	-4.526.258	2.202.492	17	2.737
a69	C26-C29	C	-6.726.852	1.139.691	29	3.530
a70	C30	A	-3.737.262	1.335.072	12	2.498
a71	C30	B	-5.477.142	2.853.052	22	3.216
a72	C30	C	-8.373.688	2.116.734	38	4.296
a73	C31	A	-3.789.090	1.297.695	12	2.520
a74	C31	B	-5.497.053	2.782.983	24	3.219
a75	C31	C	-3.208.611	882.825	39	4.356
a76	C32	A	-5.859.480	2.667.188	16	2.720
a77	C32	B	-9.375.288	1.863.428	28	3.360
a78	C32	C	-9.943.572	2.440.532	44	4.592
a79	C33	A	-3.901.360	1.173.210	15	2.560
a80	C33	B	-5.878.025	2.597.460	30	3.365
a81	C33	C	-9.402.845	1.788.325	45	4.545
a82	C34	A	-4.220.526	1.075.134	18	2.688
a83	C34	B	-6.592.524	2.433.546	36	3.654
a84	C34	C	-9.778.380	1.666.128	48	4.638
a85	E1	A	-46.218	1.049.607	8	2.353
a86	E1	B	-77.081	2.495.331	19	3.088
a87	E1	C	-258.153	1.630.104	35	4.149
a88	E2	A	-46.218	1.050.375	8	2.353
a89	E2	B	-77.081	2.496.099	19	3.088
a90	E2	C	-258.153	1.630.872	35	4.149
a91	E3	A	-46.218	1.051.143	8	2.353
a92	E3	B	-77.081	2.496.867	19	3.088
a93	E3	C	-258.153	1.631.640	35	4.149
a94	E4	A	-46.218	1.051.911	8	2.353
a95	E4	B	-77.081	2.497.635	19	3.088
a96	E4	C	-258.153	1.632.408	35	4.149
a97	E5	A	-46.218	1.053.447	8	2.353
a98	E5	B	-77.081	2.499.171	19	3.088
a99	E5	C	-258.153	1.633.944	35	4.149
a100	E6	A	-46.218	1.057.287	8	2.353
a101	E6	B	-77.081	2.503.011	19	3.088
a102	E6	C	-258.153	1.637.784	35	4.149

a103	E7-E10	A	-57.667	619.981	10	2.409
a104	E7-E10	B	-88.530	2.065.177	21	3.145
a105	E7-E10	C	-411.864	1.075.091	39	4.315
a106	E8-E11	A	-57.667	620.364	10	2.409
a107	E8-E11	B	-88.530	2.065.236	21	3.145
a108	E8-E11	C	-403.118	1.283.408	37	4.279
a109	E9-E12	A	-53.834	556.544	9	2.163
a110	E9-E12	B	-75.026	1.453.724	17	2.737
a111	E9-E12	C	-380.742	288.729	29	3.530
a112	E13	A	-63.244	525.948	12	2.498
a113	E13	B	-89.814	2.057.012	22	3.216
a114	E13	C	-406.126	1.209.644	38	4.296
a115	E14	A	-67.392	258.735	12	2.520
a116	E14	B	-104.352	1.577.148	24	3.219
a117	E14	C	-549.807	830.082	39	4.356
a118	E15	A	-80.044	-208.184	16	2.720
a119	E15	B	-118.728	1.054.172	28	3.364
a120	E15	C	-702.072	278.988	44	4.592
a121	E16	A	-83.545	-564.935	15	2.560
a122	E16	B	-131.900	574.650	30	3.365
a123	E16	C	-847.835	-205.305	45	4.545
a124	E17	A	-97.644	-1.010.634	18	2.688
a125	E17	B	-155.670	6.174	36	3.654
a126	E17	C	-998.898	-734.076	48	4.638
a127	E18	A	-3.372.105	1.008.271	8	2.353
a128	E18	B	-5.159.342	2.383.740	19	3.088
a129	E18	C	-7.872.888	1.417.214	35	4.149
a130	E19	A	-3.372.105	1.009.039	8	2.353
a131	E19	B	-5.159.342	2.384.508	19	3.088
a132	E19	C	-7.872.888	1.417.982	35	4.149
a133	E20	A	-3.372.105	1.009.807	8	2.353
a134	E20	B	-5.159.342	2.385.276	19	3.088
a135	E20	C	-7.872.888	1.418.750	35	4.149
a136	E21	A	-3.372.105	1.010.575	8	2.353
a137	E21	B	-5.159.342	2.386.044	19	3.088
a138	E21	C	-7.872.888	1.419.518	35	4.149
a139	E22	A	-3.372.105	1.012.111	8	2.353
a140	E22	B	-5.159.342	2.387.580	19	3.088
a141	E22	C	-7.872.888	1.421.054	35	4.149
a142	E23	A	-3.372.105	1.015.951	8	2.353
a143	E23	B	-5.159.342	2.391.420	19	3.088
a144	E23	C	-7.872.888	1.424.894	35	4.149
a145	E24-E27	A	-3.517.282	573.297	10	2.409
a146	E24-E27	B	-5.304.519	1.948.236	21	3.145
a147	E24-E27	C	-8.422.410	846.369	39	4.315
a148	E25-E28	A	-3.517.282	573.679	10	2.409

a149	E25-E28	B	-5.304.519	1.948.296	21	3.145
a150	E25-E28	C	-8.327.696	1.058.123	37	4.279
a151	E26-E29	A	-3.134.354	516.712	9	2.163
a152	E26-E29	B	-4.526.258	1.359.065	17	2.737
a153	E26-E29	C	-6.726.852	118.273	29	3.530
a154	E30	A	-3.737.262	470.690	12	2.498
a155	E30	B	-5.477.142	1.933.218	22	3.216
a156	E30	C	-8.373.688	982.640	38	4.296
a157	E31	A	-3.789.090	201.567	12	2.520
a158	E31	B	-5.497.053	1.453.140	24	3.219
a159	E31	C	-8.655.873	597.537	39	4.356
a160	E32	A	-4.278.148	-284.408	16	2.720
a161	E32	B	-5.859.480	916.240	28	3.364
a162	E32	C	-9.375.288	23.760	44	4.592
a163	E33	A	-3.901.360	-625.945	15	2.560
a164	E33	B	-5.878.025	436.505	30	3.365
a165	E33	C	-9.402.845	-455.810	45	4.545
a166	E34	A	-4.220.526	-1.083.852	18	2.688
a167	E34	B	-6.592.524	-159.600	36	3.654
a168	E34	C	-9.778.380	-993.558	48	4.638

Apêndice N: Resultados do ELECTRE tree com critério área normalizado.

CRITÉRIOS		Custos de investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m ²)	
Teste 1 - ELECTRE TREE (pessimista)						
	b2	-3.459.761	1.511.836	31	1,56	
	b1	-6.730.561	703.371	24	1,33	
lambda	0,71	q	1.131.812	881.156	11	0,20
acurácia	0,80	p	1.733.200	1.259.656	15	0,34
	v	3.534.265	2.012.502	23	0,60	
	k	0,61	0,41	0,31	0,44	
Teste 2 - ELECTRE TREE (otimista)						
	b2	-2.870.694	2.026.194	35	1,82	
	b1	-6.167.505	1.420.573	29	1,49	
lambda	0,75	q	909.561	859.589	10	0,18
acurácia	0,83	p	1.448.718	1.243.307	14	0,32
	v	3.265.832	2.023.468	21	0,67	
	k	0,57	0,46	0,43	0,5	
Teste 3 - Média Pesos stakeholders (pessimista)						
	b2	-3.406.520	1.421.125	28	1,56	
	b1	-6.471.104	655.700	20	1,34	
lambda	0,70	q	945.436	911.211	13	0,22
acurácia	0,77	p	1.554.863	1.289.675	18	0,38
	v	3.526.939	2.007.303	23	0,65	
	k	0,69	0,82	0,83	0,52	
Teste 4 - Média Pesos stakeholders (otimista)						
	b2	-3.042.734	1.958.131	36	1,84	
	b1	-6.181.167	1.291.109	31	1,48	
lambda	0,75	q	876.939	826.611	10	0,18
acurácia	0,84	p	1.356.104	1.210.178	14	0,31
	v	3.283.759	2.053.905	21	0,52	
	k	0,69	0,82	0,83	0,52	
Teste 5 - Moda Pesos stakeholders (pessimista)						
	b2	-3.531.279	1.369.456	28	1,57	

		b1	-6.574.705	559.564	21	1,35
lambda	0,69	q	1.035.705	917.211	12	0,21
acurácia	0,77	p	1.608.794	1.318.038	17	0,36
		v	3.645.526	2.000.836	23	0,65
		k	0,90	1,00	1,00	0,50
Teste 6 - Moda Pesos stakeholders (otimista)						
		b2	-2.997.054	2.079.761	36	1,82
		b1	-6.297.977	1.451.453	30	1,46
lambda	0,74	q	896.071	860.830	10	0,18
acurácia	0,84	p	1.379.234	1.207.436	14	0,29
		v	3.341.521	2.031.365	21	0,54
		k	0,90	1,00	1,00	0,50
Teste 7 - Mediana Pesos stakeholders (pessimista)						
		b2	-3.535.509	1.338.297	29	1,55
		b1	-6.478.818	566.375	21	1,34
lambda	0,71	q	1.077.033	934.939	13	0,22
acurácia	0,76	p	1.699.297	1.320.876	17	0,37
		v	3.529.789	1.992.471	23	0,63
		k	0,70	0,90	0,90	0,50
Teste 8 - Mediana Pesos stakeholders (otimista)						
		b2	-2.978.265	1.997.800	35	1,82
		b1	-6.066.694	1.345.253	29	1,45
lambda	0,75	q	862.367	881.536	10	0,18
acurácia	0,83	p	1.329.073	1.269.086	14	0,30
		v	3.018.789	1.992.324	21	0,54
		k	0,70	0,90	0,90	0,50

Apêndice O: Resultado da Análise de Sensibilidade 1 (Resíduos).

ELECTRE TREE	Cenários	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m²)
	b2	-97.160	89.863	12	1,55
	b1	-148.491	-164.252	10	1,41
	q	54.815	220.969	3	0,12
	p	71.630	305.493	4	0,16
	v	117.036	525.997	5	0,26
	k	0,69	0,82	0,83	0,52
	C1 B	-28.643	552.184	6	1,74
	C2 B	-28.643	552.390	6	1,74
	C3 B	-28.643	552.597	6	1,74
	C4 B	-28.643	552.803	6	1,74
	C5 B	-28.643	553.216	6	1,74
	C6 B	-28.643	554.248	6	1,74
	C7-C10 B	-41.389	469.431	9	1,50
	C8-C11 B	-42.782	486.803	9	1,67
	C13 B	-37.002	483.680	8	1,53
	C14 B	-45.804	431.193	9	1,56
	C15 B	-59.928	350.660	12	1,36
	C16 B	-74.025	264.790	15	1,21
	C17 A	-88.098	-188.886	18	1,09
	C17 B	-88.098	173.580	18	1,09
	C17 C	-899.538	-69.396	18	1,00
	E1 B	-28.643	119.993	6	1,74
	E2 B	-28.643	120.199	6	1,74
	E3 B	-28.643	120.406	6	1,74
	E4 B	-28.643	120.612	6	1,74
	E5 B	-28.643	121.025	6	1,74
	E6 B	-28.643	122.057	6	1,74

E7-E10 B	-41.389	-322.592	9	1,50
E8-E11 B	-42.782	-305.220	9	1,50
E13 B	-37.002	-247.072	8	1,53
E14 B	-45.804	-648.300	9	1,56
E15 B	-59.928	-1.088.664	12	1,36
E16 B	-74.025	-1.534.365	15	1,21

* $\lambda = 0,75$ e acurácia = 0,94.

Apêndice P: Resultado da Análise de Sensibilidade 2 (Salários cooperados).

ELECTRE TREE	Cenários	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m²)
b2		-148.511	2.255.100	30	1,48
b1		-190.868	1.886.360	27	1,43
q		56.562	235.721	4	0,06
p		79.513	332.098	6	0,08
v		123.521	602.191	8	0,13
k		0,69	0,82	0,83	0,52
	C1 B	-77.081	2.769.317	19	1,50
	C2 B	-77.081	2.770.085	19	1,50
	C3 B	-77.081	2.770.853	19	1,50
	C4 B	-77.081	2.771.621	19	1,50
	C5 B	-77.081	2.773.157	19	1,50
	C6 B	-77.081	2.776.997	19	1,50
	C7-C10 B	-88.530	2.670.555	21	1,47
	C8-C11 B	-88.530	2.662.660	21	1,47
	C13 B	-89.814	2.637.514	22	1,44
	C14 B	-104.352	2.536.812	24	1,44
	C15 B	-118.728	2.373.240	28	1,38
	C16 B	-131.900	2.272.880	30	1,38
	C17 A	-97.644	870.714	18	1,73
	C17 B	-155.670	2.044.050	36	1,27
	C17 C	-998.898	1.185.252	48	1,00
	E1 B	-77.081	2.495.331	19	1,50
	E2 B	-77.081	2.496.099	19	1,50
	E3 B	-77.081	2.496.867	19	1,50
	E4 B	-77.081	2.497.635	19	1,50
	E5 B	-77.081	2.499.171	19	1,50
	E6 B	-77.081	2.503.011	19	1,50
	E7-E10 B	-88.530	2.065.177	21	1,47
	E8-E11 B	-88.530	2.065.236	21	1,47
	E13 B	-89.814	2.057.012	22	1,44
	E14 B	-104.352	1.577.148	24	1,44
	E15 B	-118.728	1.054.172	28	1,38
	E16 B	-131.900	574.650	30	1,38

* $\lambda = 0,75$ e acurácia = 0,94.

Apêndice Q: Resultado da Análise de Sensibilidade 3 (Valor de mercado dos resíduos).

ELECTRE TREE	Cenários	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m²)
b2		-151.767	766.148	30	1,49
b1		-229.279	390.961	27	1,43
q		73.035	220.251	4	0,06

p		99.321	315.155	6	0,09
v		152.336	593.070	8	0,14
k		0,69	0,82	0,83	0,52
	C1 B	-77.801	1.233.267	19	1,50
	C2 B	-77.801	1.234.035	19	1,50
	C3 B	-77.801	1.234.803	19	1,50
	C4 B	-77.801	1.235.571	19	1,50
	C5 B	-77.801	1.237.107	19	1,50
	C6 B	-77.801	1.240.947	19	1,50
	C7-C10 B	-88.530	1.161.423	21	1,47
	C8-C11 B	-88.530	1.161.178	21	1,47
	C13 B	-89.814	1.147.736	22	1,44
	C14 B	-104.352	1.077.882	24	1,44
	C15 B	-118.728	976.008	28	1,38
	C16 B	-131.900	906.495	30	1,38
	C17 A	-97.644	-72.924	18	1,73
	C17 B	-155.670	770.208	36	1,27
	C17 C	-998.898	562.104	48	1,00
	E1 B	-77.081	666.221	19	1,50
	E2 B	-77.081	666.989	19	1,50
	E3 B	-77.081	667.757	19	1,50
	E4 B	-77.081	668.525	19	1,50
	E5 B	-77.081	670.061	19	1,50
	E6 B	-77.081	673.901	19	1,50
	E7-E10 B	-88.530	240.091	21	1,47
	E8-E11 B	-88.530	239.846	21	1,47
	E13 B	-89.814	227.902	22	1,44
	E14 B	-104.352	-251.961	24	1,44
	E15 B	-118.728	-774.940	28	1,38
	E16 B	-131.900	-1.254.460	30	1,38

* $\lambda = 0,73$ e acurácia = 0,86.

Apêndice R: Resultado da Análise de Sensibilidade 4, 5, 6 e 7 (combinação das análises).

ELECTRE TREE	Cenários	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Funcionários (unidade)	Área (m ²)
OTIMISTA – PESOS STAKEHOLDERS*					
	b2	-93.015	-341.059	13	1,54
	b1	-146.349	-585.497	11	1,41
	q	49.510	228.061	3	0,11
	p	70.826	311.539	4	0,16
	v	109.347	523.999	5	0,25
	k	0,69	0,82	0,83	0,52
PESSIMISTA – PESOS STAKEHOLDERS**					
	b2	-192.179	-397.508	10	1,51
	b1	-173.098	-642.259	9	1,35
	q	49.858	254.080	3	0,1
	p	71.762	351.589	4	0,16
	v	113.934	572.732	6	0,28
	k	0,69	0,82	0,83	0,52
PESSIMISTA – PESOS RESULTADO OPERACIONAL E FUNCIONÁRIOS IGUAIS***					
	b2	-101.086	-331.085	13	1,54
	b1	-150.832	-562.082	11	1,39
	q	57.722	230.167	3	0,12
	p	80.415	327.873	4	0,18
	v	119.322	538.882	5	0,28

k	0,69	0,82	0,82	0,52
PESSIMISTA – PESOS RESULTADO OPERACIONAL MAIOR QUE FUNCIONÁRIOS****				
b2	-99.532	-347.428	13	1,54
b1	-156.864	-589.359	11	1,40
q	56.180	221.607	3	0,12
p	80.611	313.461	4	0,16
v	121.599	517.620	5	0,27
k	0,69	0,87	0,83	0,52
C1 B	-28.643	77.671	6	1,74
C2 B	-28.643	77.878	6	1,74
C3 B	-28.643	78.084	6	1,74
C4 B	-28.643	78.291	6	1,74
C5 B	-28.643	78.703	6	1,74
C6 B	-28.643	79.735	6	1,74
C7-C10 B	-41.389	-52.594	9	1,50
C8-C11 B	-42.782	-42.971	9	1,50
C13 B	-37.002	-21.682	8	1,53
C14 B	-45.804	-89.592	9	1,56
C15 B	-59.928	-219.356	12	1,36
C16 B	-74.025	-351.500	15	1,21
C17 A	-89.178	-728.076	18	1,09
C17 B	-88.098	-486.024	18	1,09
C17 C	-899.538	-616.566	18	1,00
E1 B	-28.643	-261.975	6	1,74
E2 B	-28.643	-261.768	6	1,74
E3 B	-28.643	-261.562	6	1,74
E4 B	-28.643	-261.355	6	1,74
E5 B	-28.643	-260.943	6	1,74
E6 B	-28.643	-259.911	6	1,74
E7-E10 B	-41.389	-705.798	9	1,50
E8-E11 B	-42.782	-696.175	9	1,50
E13 B	-37.002	-629.040	8	1,53
E14 B	-45.804	-1.030.266	9	1,56
E15 B	-59.928	-1.473.572	12	1,36
E16 B	-74.025	-1.919.295	15	1,21

* $\lambda = 0,74$ e acurácia = 0,94.

** $\lambda = 0,73$ e acurácia = 0,79.

*** $\lambda = 0,75$ e acurácia = 0,94.

**** $\lambda = 0,75$ e acurácia = 0,93.

Apêndice S: Resultado da Análise de Sensibilidade 8 (combinação sem funcionários).

ELECTRE TREE	Cenários	Custos de Investimento (R\$)	Resultado operacional (R\$/ano)	Área (m²)
b2		-96618	-160118	1,56
b1		-170245	-327172	1,38
q		60602	281588	0,14
p		84825	376327	0,2
v		112943	561618	0,3
k		0,69	0,82	0,52
	C1 B	-28643	77671	1,74
	C2 B	-28643	77878	1,74
	C3 B	-28643	78084	1,74
	C4 B	-28643	78291	1,74
	C5 B	-28643	78703	1,74
	C6 B	-28643	79735	1,74
	C7-C10 B	-41389	-52594	1,50

C8-C11 B	-42782	-42971	1,50
C13 B	-37002	-21682	1,53
C14 B	-45804	-89592	1,56
C15 B	-59928	-219356	1,36
C16 B	-74025	-351500	1,21
C17 A	-89178	-728076	1,09
C17 B	-88098	-486024	1,09
C17 C	-899538	-616566	1,00
E1 B	-28643	-261975	1,74
E2 B	-28643	-261768	1,74
E3 B	-28643	-261562	1,74
E4 B	-28643	-261355	1,74
E5 B	-28643	-260943	1,74
E6 B	-28643	-259911	1,74
E7-E10 B	-41389	-705798	1,50
E8-E11 B	-42782	-696175	1,50
E13 B	-37002	-629040	1,53
E14 B	-45804	-1030266	1,56
E15 B	-59928	-1473572	1,36
E16 B	-74025	-1919295	1,21

* $\lambda = 0,75$ e acurácia = 0,90.

Apêndice T: Categorização otimista das alternativas para o Teste 4 e as análises de sensibilidade.

Alternativas	AS 1	AS 2	AS 3	AS 4	AS 5	AS 6	AS 7	AS 8
C1	B	A	A	A	A	A	A	A
C2	B	A	A	A	A	A	A	A
C3	B	A	A	A	A	A	A	A
C4	B	A	A	A	A	A	A	A
C5	B	A	A	A	A	A	A	A
C6	B	A	A	A	A	A	A	A
C7	B	A	A	A	B	A	C	A
C8	B	A	A	A	B	A	C	A
C13	B	A	A	A	A	A	C	A
C14	B	A	B	A	B	A	C	B
C15	B	A	A	A	A	A	C	A
C16	B	B	A	A	B	A	B	B
C17	A	A	A	A	A	A	A	A
C17	B	A	A	A	A	A	A	A
C17	C	A	A	A	A	A	A	A
E1	B	A	B	B	A	A	B	A
E2	B	A	B	B	A	A	B	A
E3	B	A	B	B	A	A	B	A
E4	B	A	B	B	A	A	B	A
E5	B	A	B	B	A	A	B	A
E6	B	A	B	B	A	A	B	A
E7	B	B	C	B	B	A	C	B
E8	B	B	C	B	B	A	C	B
E13	B	B	B	B	B	A	C	B
E14	B	B	B	C	B	A	C	B
E15	B	C	C	C	C	A	C	C
E16	B	B	C	C	B	A	B	B