

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE
ECONÔMICA DA LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE
EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

Flávia Gontijo Cunha

Itajubá

Fevereiro 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Flávia Gontijo Cunha

MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE
ECONÔMICA DA LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE
EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**

Área de concentração: Engenharia de Produção (Sistemas de Produção e Logística)

Orientador: Prof. Dr. Renato da Silva Lima

Itajubá

Fevereiro 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

Flávia Gontijo Cunha

MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DE VIABILIDADE
ECONÔMICA DA LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE
EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Produção**

Banca examinadora:

Prof. Dr. Rafael de Carvalho Miranda

Prof^a Dra. Marcella Papini

Orientador: Prof. Dr. Renato da Silva Lima

Itajubá

Fevereiro 2024

“Dedico este trabalho a Deus, que me fortaleceu em todos os momentos e me permitiu esta conquista. Aos meus pais, Gislene Gontijo Cunha e Célio José da Cunha que são minhas maiores riquezas”.

*“Uma caminhada de mil léguas começa com o primeiro passo”
Lao Tsé*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por abençoar o meu caminho e me conceder mais essa conquista.

Agradeço aos meus pais pelo amor incondicional, pelo apoio e por cada palavra motivadora me ajudando a enfrentar os obstáculos, para que este momento fosse possível. Obrigada por acreditarem em mim e por sempre sonharem os meus sonhos comigo.

Agradeço ao Douglas por cada palavra motivadora, por estar sempre presente e demonstrar interesse em acompanhar de perto todas as minhas realizações.

Agradeço ao meu orientador Renato por todo o conhecimento compartilhado, pela oportunidade e por ter acreditado em mim.

Agradeço a todos os professores, funcionários e colegas do Instituto de Engenharia de Produção e Gestão da Universidade Federal de Itajubá, com os quais tive a oportunidade e privilégio de trocar experiências, contar com seus auxílios e ampliar meus conhecimentos, o que possibilitou a conclusão desta pesquisa.

Agradeço ao Fabio Carvalho de Castro pela oportunidade de parceria, pelo tempo, pelas informações concedidas, nas quais foram importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço aos colegas do LogTranS pelos ensinamentos, experiências compartilhadas, apoios, incentivos e por torcerem por mim.

Agradeço às agências de fomento Capes, CNPQ e FAPEMIG pelo apoio financeiro concedido que permitiu a participação em congresso e concederam a bolsa de estudo.

E também agradeço aos membros da banca examinadora pelas contribuições.

RESUMO

O avanço tecnológico nas últimas décadas proporcionou inúmeras melhorias na vida cotidiana, entretanto trouxe à tona preocupações acerca da gestão dos Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (REEE), visto que a geração de resíduos é inevitável. Grande parte destes resíduos é descartada de forma inadequada, prática que além de ser prejudicial ao meio ambiente e à saúde humana, resulta na perda de materiais presentes na composição desses equipamentos. Essa situação impulsionou o desenvolvimento de legislações e diretrizes, a fim de alcançar as metas da Economia Circular, a partir da ajuda de algumas ferramentas como a Logística Reversa (LR), e com isso mitigar os impactos ambientais e construir um sistema mais sustentável. No entanto, apenas 17,40% do total de REEE gerado no mundo é reciclado atualmente. Diversos estudos foram conduzidos na literatura científica sobre a gestão de REEE, contudo, poucos estudos se concentram na análise de viabilidade econômica. Diante disso, este trabalho tem o objetivo de desenvolver um modelo matemático e empregar a Simulação de Monte Carlo (SMC), para avaliar a viabilidade econômica da LR aplicada aos REEEs, em duas situações. A primeira situação envolve apenas a coleta e venda das peças inteiras dos REEEs, referida como RInt; enquanto a segunda inclui a coleta, pré-tratamento, trituração e venda, designada como RDesmont. O estudo foi conduzido utilizando a técnica IDEF-SIM, a SMC, a elaboração do Fluxo de Caixa Incremental (FCI). Além disso, foram utilizados os indicadores de viabilidade econômica, Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). O modelo proposto foi aplicado em uma empresa especializada em gestão de resíduos localizada no sul de Minas Gerais. Para conduzir as análises, foram estabelecidos nove cenários, nos quais variáveis de preços e distâncias foram modificadas. Os resultados obtidos a partir do modelo proposto revelaram que, com a coleta atual de uma quantidade total de 3.529 kg de REEE, nenhuma das duas situações, RInt e RDesmont, mostrou-se economicamente viável. Para viabilizar ambas as situações, seria necessário aumentar a coleta em 76,54% para a situação RInt e em 186,31% para a RDesmont. A análise revela também que um investimento mais elevado em um projeto não necessariamente resulta em VPLs superiores. Portanto, se os investimentos e os custos de reciclagem continuarem elevados, RDesmont apresentará valores de VPLs inferiores a RInt. Uma sugestão de melhoria para a situação RDesmont refere-se à fase de desmontagem. Verifica-se que ao reduzir o tempo de desmontagem, o RDesmont se torna mais viável economicamente do que o RInt. Dessa maneira, a adoção do *ecodesign* ao projetar Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEEs) de forma que sejam facilmente desmontáveis pode contribuir significativamente para a redução dos custos associados à reciclagem. Por fim, conclui-se que ao reduzir os valores dos tributos, há uma melhoria nos valores dos VPLs. No entanto, a implementação de incentivos econômicos, tais como isenções ou reduções fiscais, embora benéfica, por si só não são suficientes para conferir à situação RDesmont uma viabilidade econômica superior à RInt.

Palavras-chave: Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico, Logística Reversa, Simulação de Monte Carlo, Análise de viabilidade econômica, Economia Circular.

ABSTRACT

The technological advancements in recent decades have brought numerous improvements to daily life; however, they have also raised concerns about the management of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), as waste generation is inevitable. A large portion of this waste is improperly disposed of, a practice that not only harms the environment and human health but also results in the loss of materials present in these equipment compositions. This situation has driven the development of legislation and guidelines to achieve Circular Economy goals, aided by tools such as Reverse Logistics (RL), aiming to mitigate environmental impacts and build a more sustainable system. However, currently, only 17.40% of the total WEEE generated worldwide is recycled. Various studies have been conducted in the scientific literature on WEEE management; however, few studies focus on economic feasibility analysis. Therefore, this work aims to develop a mathematical model and employ Monte Carlo Simulation (MCS) to evaluate the economic viability of RL applied to WEEE in two situations. The first situation involves only the collection and sale of intact parts of WEEE, referred to as RInt, while the second includes collection, pre-treatment, shredding, and sale, designated as RDesmont. The study was conducted using the IDEF-SIM technique, MCS, and the development of Incremental Cash Flow (ICF). Additionally, economic feasibility indicators, Net Present Value (NPV), and Internal Rate of Return (IRR) were used. The proposed model was applied to a waste management company located in southern Minas Gerais. To conduct the analyses, nine scenarios were established, in which price and distance variables were modified. The results obtained from the proposed model revealed that, with the current collection of a total quantity of 3,529 kg of WEEE, neither of the two situations, RInt and RDesmont, proved to be economically viable. To make both situations viable, it would be necessary to increase collection by 76.54% for the RInt situation and by 186.31% for RDesmont. The analysis also reveals that a higher investment in a project does not necessarily result in higher NPVs. Therefore, if investments and recycling costs remain high, RDesmont will present NPV values lower than RInt. An improvement suggestion for the RDesmont situation concerns the disassembly phase. It is noted that by reducing the disassembly time, RDesmont becomes more economically viable than RInt. Thus, adopting ecodesign when designing Electrical and Electronic Equipment (EEE) so that they are easily disassembled can significantly contribute to reducing recycling costs. Finally, it was also verified that reducing tax values results in improvements in NPV values. However, the implementation of economic incentives, such as exemptions or tax reductions, while beneficial, is not sufficient on its own to confer greater economic viability to the RDesmont situation compared to RInt.

Keywords: Waste electrical and electronic equipment, Reverse Logistics, Monte Carlo Simulation, Economic feasibility assessment, Circular economy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Sistema de logística reversa de REEE | 34 |
| Figura 2 - Pré-processamento de REEE e trituração | 35 |
| Figura 3 - Ciclo de implementação do método de modelagem e simulação | 46 |
| Figura 4 - Classificação desta pesquisa | 50 |
| Figura 5 - Modelo conceitual do RInt | 56 |
| Figura 6 - Modelo conceitual do RDesmont | 56 |
| Figura 7 - Distância percorrida para coleta e venda dos REEEs | 60 |

GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1 - Métodos de pesquisa mais empregados na LR de REEE..... | 27 |
| Gráfico 2 - Temas de pesquisa dos estudos | 27 |
| Gráfico 3 - Resultado da análise de sensibilidade na situação RInt | 86 |
| Gráfico 4 - Resultado da análise de sensibilidade na situação RDesmont | 87 |
| Gráfico 5 - Análise entre a quantidade, VPL mais provável e mínimo em RInt..... | 91 |
| Gráfico 6 - Análise entre a quantidade, VPL mais provável e mínimo em RDesmont.. | 91 |
| Gráfico 7 - RInt versus RDesmont | 92 |
| Gráfico 8 - Comparação dos VPL entre RDesmont e RDesmont50DT | 93 |
| Gráfico 9 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont50DT | 94 |
| Gráfico 10 - RInt versus RDesmont50DT | 94 |
| Gráfico 11 - Comparação dos VPL entre RDesmont e RDesmont75T | 95 |
| Gráfico 12 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont75T | 96 |
| Gráfico 13 - RInt versus RDesmont75T | 96 |
| Gráfico 14 - VPL na situação RInt cenário inicial | 117 |
| Gráfico 15 - VPL na situação RInt cenário 1 | 117 |
| Gráfico 16 - VPL na situação RInt cenário 2 | 118 |
| Gráfico 17 - VPL na situação RInt cenário 3 | 118 |
| Gráfico 18 - VPL na situação RInt cenário 4 | 119 |
| Gráfico 19 - VPL na situação RInt cenário 5 | 119 |
| Gráfico 20 - VPL na situação RInt cenário 6 | 120 |
| Gráfico 21 - VPL na situação RInt cenário 7 | 120 |
| Gráfico 22 - VPL na situação RInt cenário 8 | 121 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 23 - VPL na situação RInt cenário 9 | 121 |
| Gráfico 24 - VPL na situação RDesmont cenário inicial | 122 |
| Gráfico 25 - VPL na situação RDesmont cenário 1 | 122 |
| Gráfico 26 - VPL na situação RDesmont cenário 2 | 123 |
| Gráfico 27 - VPL na situação RDesmont cenário 3 | 123 |
| Gráfico 28 - VPL na situação RDesmont cenário 4 | 124 |
| Gráfico 29 - VPL na situação RDesmont cenário 5 | 124 |
| Gráfico 30 - VPL na situação RDesmont cenário 6 | 125 |
| Gráfico 31 - VPL na situação RDesmont cenário 7 | 125 |
| Gráfico 32 - VPL na situação RDesmont cenário 8 | 126 |
| Gráfico 33 - VPL na situação RDesmont cenário 9 | 126 |

QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Pesquisas sobre REEEs e sua LR | 19 |
| Quadro 2 - Artigos na literatura sobre a viabilidade econômica da LR de REEE | 29 |
| Quadro 3 - Malefícios causados pelos elementos dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos..... | 31 |
| Quadro 4 - Materiais e métodos empregados na aplicação da metodologia de simulação | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Custo com uma mão de obra no processo de desmontagem e trituração | 61 |
| Tabela 2 - Valores das variáveis de entrada | 62 |
| Tabela 3 - Oscilação das variáveis no Cenário Inicial dos Modelos 1 e 2 | 64 |
| Tabela 4 - Distribuições estatísticas do RInt no cenário inicial | 65 |
| Tabela 5 - Distribuições estatísticas do RDesmont no cenário inicial | 65 |
| Tabela 6 - Dados do WACC..... | 68 |
| Tabela 7 - Oscilação das variáveis preço na situação RInt..... | 69 |
| Tabela 8 - Oscilação das variáveis distância de venda na situação RInt..... | 70 |
| Tabela 9 - Oscilação das variáveis distância de coleta e venda na situação RInt..... | 71 |
| Tabela 10 - Oscilação das variáveis preço nos cenários 1 e 2 na situação RDesmont.. | 71 |
| Tabela 11 - Oscilação das variáveis distância de venda nos cenários 3 e 4 na situação RDesmont..... | 72 |
| Tabela 12 - Oscilação das variáveis distância de venda nos cenários 5 e 6 na situação RDesmont..... | 73 |
| Tabela 13 - Oscilação das variáveis distância de coleta e venda nos cenários 7 e 8 na situação RDesmont..... | 73 |
| Tabela 14 - Oscilação das variáveis distância de coleta e venda no cenário 9 na situação RDesmont..... | 74 |
| Tabela 15 - Cenários alternativos na situação RInt | 74 |
| Tabela 16 - Cenários alternativos 1 e 2 na situação RDesmont | 76 |
| Tabela 17 - Cenários alternativos 1 ao 6 na situação RDesmont | 76 |
| Tabela 18 - Cenários alternativos 7 ao 9 na situação RDesmont | 77 |
| Tabela 19 - Quantidade de REEE seus respectivos VPL e TIR na situação RInt | 83 |
| Tabela 20 - Quantidade de REEE seus respectivos VPL e TIR na situação RDesmont | 85 |
| Tabela 21 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont..... | 86 |
| Tabela 22 - Resultado dos aspectos econômico, ambiental e social em RInt | 88 |
| Tabela 23 - Resultado dos aspectos econômico, ambiental e social em RDesmont | 89 |
| Tabela 24 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont50DT | 93 |
| Tabela 25 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont75T | 95 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|----------|--|
| Cofins | Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social |
| CSLL | Contribuição Social sobre o Lucro Líquido |
| EC | Economia Circular |
| EEE | Equipamento Elétrico Eletrônico |
| EPI | Equipamento de Proteção Individual |
| ICMS | Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços |
| IPI | Imposto sobre Produtos Industrializados |
| IRPJ | Imposto sobre a Renda das Pessoas Jurídicas |
| LAJIR | Lucro Antes de Juros e Impostos |
| LR | Logística Reversa |
| Mt | Milhões de toneladas |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PCI | Placas de Circuito Impresso |
| PIS | Programa de Integração Social |
| PNRS | Política Nacional de Resíduos Sólidos |
| RDesmont | Resíduo desmontado |
| REEE | Resíduo de Equipamento Elétrico e Eletrônico |
| RInt | Resíduo inteiro |
| SEL | Sistema Econômico Linear |
| SMC | Simulação de Monte Carlo |
| TI | Tecnologia de Informação |
| TIR | Taxa Interna de Retorno |
| TT | <i>Takt-Time</i> |
| TMA | Taxa Mínima de Atratividade |
| VPL | Valor Presente Líquido |
| WACC | <i>Weighted Average Capital Cost</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|--|
| A_W | Capacidade total, do veículo 'W', neste estudo é o caminhão; |
| B_W | Consumo de combustível, do veículo 'W', neste estudo é o caminhão; |
| β_L | Beta alavancado; |
| β_u | Beta desalavancado; |
| CO_2 | Dióxido de carbono; |
| D | Valor de mercado das dívidas (<i>debt</i>); |
| $d_{CN,i}$ | Distância percorrida, no trajeto de venda do componente nobre 'CN', deslocamento de ida e volta, durante o ano 'i'; |
| $d_{Int,i}$ | Distância percorrida, no trajeto de venda da peça inteira 'Int', deslocamento de ida e volta, durante o ano 'i'; |
| $d_{M,i}$ | Distância percorrida, no trajeto de venda do metal 'M', deslocamento de ida e volta, durante o ano 'i'; |
| $d_{P,i}$ | Distância percorrida, no trajeto de venda do plástico triturado 'P', deslocamento de ida e volta, durante o ano 'i'; |
| $d_{R,i}$ | Distância percorrida, no trajeto de encaminhamento do rejeito ao aterro 'R', deslocamento de ida e volta, durante o ano 'i'; |
| $d_{coleta,i}$ | Distância percorrida, no trajeto de coleta 'coleta', deslocamento de ida e volta, durante o ano 'i'; |
| E | Valor de mercado do capital próprio (<i>equity</i>); |
| $E_{linha,i}$ | Quantidade total do poluente, em fonte tipo linha, do poluente i emitido; |
| FC_0 | Fluxo de caixa no período 0; |
| FC_i | Fluxo de caixa, durante o ano 'i'; |
| $F_{e,i}$ | Fator de emissão (F_e) do poluente i ($g. Km^{-1}$); |
| $F_{r,j}$ | Número total de veículos (F_r), de carga j que circulam na via de interesse durante um período de tempo t; |
| $G_{A,i}$ | Despesa, com o aluguel do empreendimento 'A', durante o ano 'i'; |
| $G_{E,i}$ | Despesa, com a energia elétrica 'E', durante o ano 'i'; |
| $G_{F,i}$ | Despesa, financeira (Juros) 'F', durante o ano 'i'; |
| $G_{L,i}$ | Despesa, com a limpeza 'L', durante o ano 'i'; |
| $G_{MOE,i}$ | Despesa, com a mão de obra para o escritório 'MOE', durante o ano 'i'; |
| $G_{TI,i}$ | Despesa, com o telefone e a internet 'TI', durante o ano 'i'; |
| $G_{U,i}$ | Despesa, com a água 'U', durante o ano 'i'; |

| | |
|---------------|---|
| i | Horizonte de planejamento do investimento; |
| J_i | Depreciação, durante o ano 'i'; |
| J_{Acum} | Depreciação acumulada; |
| K_d | Custo de capital de terceiros; |
| K_e | Custo de capital próprio; |
| $K_{K,i}$ | Custo, com a mão de obra do processo 'K', neste estudo é a desmontagem e trituração, durante o ano 'i'; |
| K_i | Custo no período i ; |
| L | Comprimento total em quilômetros (km); |
| $LAIR_i$ | Lucro antes do imposto de renda, durante o ano 'i'; |
| $LAJIR_i$ | Lucro antes de juros e imposto de renda, durante o ano 'i'; |
| LB_i | Lucro bruto, durante o ano 'i'; |
| LL_i | Lucro líquido, durante o ano 'i'; |
| M_{Medio} | Peso médio do EEE estudado; |
| $P_{CN,i}$ | Preço, de venda do componente nobre 'CN', durante o ano 'i'; |
| $P_{Comb,i}$ | Preço, do combustível 'Comb', durante o ano 'i'; |
| $P_{EPI,i}$ | Preço, do Equipamentos de Proteção Individual (EPI) do tipo 'EPI', durante o ano 'i'; |
| $P_{Int,i}$ | Preço, de venda da peça inteira 'Int', durante o ano 'i'; |
| $P_{M,i}$ | Preço, de venda do metal 'M', durante o ano 'i'; |
| $P_{Man,W,i}$ | Preço, da manutenção 'Man', do veículo 'W', durante o ano 'i'; |
| $P_{Maq,i}$ | Preço, do maquinário e ferramenta do tipo 'Maq', durante o ano 'i'; |
| $P_{P,i}$ | Preço, de venda do plástico triturado 'P', durante o ano 'i'; |
| $P_{R,i}$ | Preço, para o encaminhamento do rejeito ao aterro 'R', durante o ano 'i'; |
| P_W | Preço, do veículo 'W'; |
| Q_{EPI} | Quantidade, de EPI por mão de obra, do tipo 'EPI'; |
| Q_K | Quantidade, de mão de obra do processo 'K', neste estudo é a desmontagem e trituração; |
| Q_{MOE} | Quantidade, de mão de obra de escritório 'MOE'; |
| Q_{Maq} | Quantidade, de maquinário ou ferramenta por mão de obra, do tipo 'Maq'; |
| $Q_{residuo}$ | Quantidade, de REEE coletado 'residuo'; |
| r | Taxa de desconto considerada; |

| | |
|-------------------|--|
| RB_i | Receita bruta, durante o ano 'i'; |
| RL_i | Receita líquida, durante o ano 'i'; |
| R_c | Prêmio de risco de crédito; |
| R_f | Retorno do ativo livre de risco; |
| R_i | Receita no período i ; |
| R_m | Retorno esperado para a carteira de mercado; |
| R_p | Prêmio pelo risco do país; |
| S_{CN} | Percentual, do componente nobre 'CN' no REEE; |
| $S_{Dep, Maq, i}$ | Percentual, de depreciação 'Dep', do maquinário e ferramenta do tipo 'Maq', durante o ano 'i'; |
| S_M | Percentual, do metal 'M' no REEE; |
| S_P | Percentual, do plástico 'P' no REEE; |
| S_R | Percentual, do rejeito 'R' no REEE; |
| $S_{trb, S}$ | Percentual, do tributo sobre receita bruta do tipo 'trb', do local no qual o tributo incide 'S'; |
| $S_{tl, S}$ | Percentual, do tributo sobre lucro do tipo 'tl', do local no qual o tributo incide 'S'; |
| t | Alíquota do IR e da contribuição social sobre o lucro; |
| T_m | Taxa marginal de imposto; |
| U_{Desm} | Tempo, para a desmontagem 'Desm'; |
| U_{HP} | Tempo, do horizonte de planejamento do Fluxo de Caixa; |
| U_{Tmes} | Tempo total de trabalho mensal 'Tmes' em minutos; |
| U_{Tri} | Tempo, para a trituração 'Tri'; |
| $V_{Amort, i}$ | Valor, da amortização 'Amort', durante o ano 'i'; |
| $V_{CapG, i}$ | Valor, do capital de giro 'CapG'; |
| $V_{Finan, i}$ | Valor, do financiamento liberado do tipo 'Finan', durante o ano 'i'; |
| $V_{Invest, i}$ | Valor, do investimento 'Invest'; |
| V_{ResVA} | Valor, do resultado da venda do ativo 'ResVA'; |
| VR_i | Valor residual, durante o ano 'i'; |
| V_{TMA} | Valor, da Taxa Mínima de Atratividade 'TMA'. |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 1.1 | Objetivo geral e específicos | 21 |
| 1.2 | Justificativa | 22 |
| 1.3 | Estrutura da dissertação | 24 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 25 |
| 2.1 | Análise bibliométrica | 25 |
| 2.2 | Resíduos de equipamentos elétricos eletrônicos | 30 |
| 2.3 | Logística reversa dos resíduos de equipamentos elétricos eletrônicos | 32 |
| 2.4 | Análise de viabilidade econômica de projetos | 38 |
| 2.5 | Modelagem e simulação | 45 |
| 2.6 | Simulação de Monte Carlo | 47 |
| 3 | MÉTODO DE PESQUISA | 49 |
| 3.1 | Classificação do estudo | 49 |
| 3.2 | Metodologia de simulação | 50 |
| 3.2.1 | Fase de conceitualização | 51 |
| 3.2.2 | Fase de modelagem | 52 |
| 3.2.3 | Fase de solução pelo modelo | 53 |
| 3.2.4 | Fase de implementação | 54 |
| 3.3 | Caracterização do local de estudo | 54 |
| 4 | DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO | 55 |
| 4.1 | Fase de conceitualização | 55 |
| 4.2 | Fase de modelagem | 65 |
| 4.3 | Fase de solução pelo modelo | 69 |
| 4.4 | Fase de implementação | 79 |
| 5 | RESULTADOS DA SIMULAÇÃO | 80 |
| 6 | ANÁLISE DOS RESULTADOS | 90 |

| | |
|--|-----|
| 7 CONCLUSÕES | 98 |
| 7.1 Trabalhos futuros | 101 |
| REFERÊNCIAS | 102 |
| APÊNDICE A - Demonstração do Resultado de Exercício e Fluxo de Caixa nas situações RInt e RDesmont, respectivamente | 115 |
| APÊNDICE B - Distribuições do VPL na situação RInt | 117 |
| APÊNDICE C - Distribuições do VPL na situação RDesmont | 122 |
| ANEXO D - Relação dos trabalhos publicados pela autora: | 127 |

1 INTRODUÇÃO

O estilo de vida da população mundial – de consumo acelerado e desordenado de produtos – tem provocado um aumento excessivo na quantidade de resíduos (SINIR, 2023). Os Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) tem a taxa de crescimento de resíduo mais rápida em escala global, podendo se tornar um problema de dimensões incontroláveis (Zhao; Bai, 2021). De acordo com o relatório da *Global E-Waste Monitor 2020* da Organização das Nações Unidas (ONU) a quantidade de REEE atingiu a marca inédita de 53,6 milhões de toneladas de resíduos gerados em todo o mundo somente em 2019, com apenas 17,40% deste total reciclado (Forti *et al.*, 2020). A *United Nations Institute for Training and Research* alerta que a quantidade de REEE gerada dobrará até 2050 (Parajuly *et al.*, 2019).

Os REEEs são compostos por metais perigosos e preciosos (Akram *et al.*, 2019; Huisman *et al.*, 2017). Conforme Peiró, Girón e Durany (2020), estes resíduos apresentam concentrações de metais valiosos superiores aos minérios extraídos das minas. Porém, ao serem descartados de forma inadequada, os materiais presentes na composição desses resíduos são perdidos (Dias *et al.*, 2022). Além disso, o descarte dos REEEs de forma incorreta ocasiona danos ambientais e impactos à saúde humana, devido a presença dos elementos químicos perigosos (Akram *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2015). Com o aumento dos Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEE), há também um alerta para a escassez de recursos naturais, representando um desafio significativo diante da capacidade limitada dos recursos na Terra (D’adamo *et al.*, 2019; Steffen *et al.*, 2015).

O crescimento exponencial na geração de REEE é consequência da velocidade de fabricação, da diminuição da vida útil dos EEEs devido a rapidez na substituição pela população, do nível de renda, das políticas em vigor, da estrutura do sistema de gestão de resíduos, entre outros fatores que interferem no comportamento de consumo e descarte (Forti *et al.*, 2020; Cole *et al.*, 2018; Achillas *et al.*, 2010). A preocupação com os hábitos de consumo e descarte fez com que cerca de 78 países implantassem legislações – representando 71% da população global – com o objetivo de estimular os processos de gestão dos resíduos, e alcançar as metas da Economia Circular (EC) (Santos; Jacob, 2022; Rocha; Penteado, 2021).

No Brasil há a Lei Federal nº 12.305 promulgada em 2 de agosto de 2010, no qual institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). A PNRS

aborda aspectos como a responsabilidade compartilhada, redução na geração de resíduos, estimula a utilização de materiais menos prejudiciais ao meio ambiente, a Logística Reversa (LR), promove a criação de um mercado para produtos recicláveis, entre outros temas (BRASIL, 2010). Com isso a legislação brasileira tem como objetivo fomentar diretamente uma EC no país (Bernardes *et al.* 2023). Há também o Decreto Federal nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020, no qual estabelece a implementação do sistema de LR de EEE e seus componentes de uso doméstico. Visando promover práticas mais sustentáveis e mitigar impactos ambientais decorrentes do descarte inadequado de resíduos (BRASIL, 2020).

Com a finalidade de reduzir os impactos ambientais causados pelo Sistema Econômico Linear (SEL), que consiste em extrair a matéria prima, transformar, consumir e descartar (Santana *et al.*, 2022), a EC baseia-se na redução, reutilização, reciclagem e produção responsável. Dessa forma, a EC concentra seus esforços no fechamento do ciclo de vida do produto, com o intuito de minimizar desperdícios e a geração de resíduos (Ellen McArthur Foundation, 2023). Visto que a geração de resíduos é inevitável, o ponto de partida de uma EC é a triagem e a recolha de resíduos. Neste contexto a LR emerge como uma ferramenta empregada para ajudar no fechamento do ciclo de vida de um produto ou material. A partir da reintegração de bens pós-consumo ou pós-venda ao ciclo produtivo (BRASIL, 2010; Almeida *et al.*, 2022).

LR é o termo que se refere ao papel da logística na reutilização, reparo, descarte, reciclagem ou destinação de resíduos (Zhou; Wang, 2008). O processo de reciclagem permite transformar parte dos REEEs em matérias-primas, reintegrando-os aos processos de fabricação de novos produtos (Agrawal; Singh; Murtaza, 2015). Apesar da reciclagem representar o último recurso em uma EC, pois significa que o valor incorporado aos produtos e componentes é perdido, ela é essencial como etapa final, permitindo que os materiais permaneçam na economia em vez de serem encaminhados a aterros (Ellen McArthur Foundation, 2023).

O pré-tratamento de REEE engloba a fase inicial da reciclagem que consiste na triagem, desmontagem e separação de materiais, representando uma etapa crucial para assegurar a eficiência dos sistemas de LR (Sales; Amorim; Souza, 2023). A reciclagem dos REEEs emerge como uma solução para preservar recursos, ao mesmo tempo em que alivia a carga ambiental decorrente da gestão inadequada no final da vida útil dos

produtos, contribuindo para a redução das emissões de toxinas e a contaminação do ar, água e solo (Ryter *et al.*, 2022).

Além de proporcionar também consequências sociais, na qual todos os REEEs descartados movimentam um mercado que gera empregos nas operações de coleta, triagem, desmontagem entre outras, conforme destacado por Tong e Wang (2004), Labuschagne, Brent e Claasen (2005) e Sarkis, Helms e Hervani (2010). Os REEEs também representam uma fonte de recursos econômicos, oferecendo oportunidades para empresas que atuam na área de LR, pois contêm diversos materiais em sua composição (Santos, 2020).

Dessa forma, nota-se a importância da LR, pois além da relevância ambiental, também pode ser avaliada em duas outras dimensões: a econômica e a social. Essa abordagem reflete os três pilares fundamentais do desenvolvimento sustentável, (*Triple Bottom Line*), destacando como a eficiência na gestão dos REEEs não apenas beneficia o meio ambiente, mas também contribui para a prosperidade econômica, para a geração de empregos e bem-estar da comunidade (Campos, 2016).

Contudo a execução da LR acarreta impactos ambientais negativos durante o transporte. Isso se torna ainda mais relevante devido às limitações ao sistema rodoviário brasileiro e ao uso predominante de combustíveis fósseis, responsáveis por altas emissões de dióxido de carbono (CO₂) (Ottoni *et al.*, 2021). Diversas pesquisas foram conduzidas abordando os REEEs e sua LR, sendo apresentados alguns exemplos no Quadro 1.

Quadro 1 – Pesquisas sobre REEEs e sua LR

| Referência | Objetivo | Método de pesquisa |
|--------------------------------------|---|---------------------------|
| Amirdadi; Dehghanian; Kohneh, (2022) | Desenvolver um sistema de LR de REEE, a partir da localização e alocação dos centros de coleta. | Modelagem e Simulação |
| Santos; Ogunesitan, (2022) | Descrever um modelo de LR como uma solução potencial para as barreiras e os desafios identificados no estudo. | Estudo de caso |
| Pourhejazy <i>et al.</i> , (2021) | Propor um esquema integrado de coleta que considere simultaneamente as demandas <i>on-call</i> e <i>door-to-door</i> . | Modelagem e Simulação |
| Dias <i>et al.</i> , (2022) | Fornecer uma melhor compreensão das forças que impulsionam a gestão de REEE, a partir da comparação entre o sistema do Brasil e da Austrália. | Estudo de caso |

| | | |
|----------------------------------|---|-----------------------|
| Rocha; Pentead, (2021) | Avaliar os benefícios e ônus ambientais decorrentes da LR que considere uma variedade de REEE, por meio da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). | Estudo de caso |
| Bernardes <i>et al.</i> , (2023) | Compreender como uma empresa de reciclagem de REEE pode engajar a sociedade e aumentar a quantidade de resíduos coletados e tratados. | Pesquisa Ação |
| Koshta; Patra; Singh, (2022) | Investiga a disposição do usuário final em pagar pela reciclagem de REEE que eles produzem. | Estudo de caso |
| Tong <i>et al.</i> , (2018) | Quantificar os REEEs que estão sendo desviados para o sistema formal de reciclagem na China. | Modelagem e Simulação |
| Reinhart <i>et al.</i> , (2023) | Realizar uma análise econômica e técnica das rotas de reciclagem pirometalúrgica para diferentes sistemas de células de bateria de íon-lítio. | Estudo de caso |
| D'Adamo <i>et al.</i> , (2023) | Avaliar a viabilidade econômica de uma planta de reciclagem de módulos fotovoltaicos policristalinos | Estudo de caso |

Apesar do grande número de pesquisas sobre a LR de REEEs, poucos estudos se concentram na análise da viabilidade econômica do processo de reciclagem (Mairizal *et al.* 2023), algo que pode ser verificado pela análise bibliométrica na seção 2.1 deste estudo, e corroborado por Sales, Amorim e Souza (2023) no qual afirmam que há uma demanda crescente por estudos que explorem a viabilidade do sistema de LR de REEE. A análise de viabilidade econômica de um projeto facilita a aplicação em um contexto real, por meio da verificação da rentabilidade do negócio (Cuchiella *et al.*, 2016; D'adamo *et al.*, 2019). No contexto de análise de viabilidade econômica, a simulação computacional destaca-se como uma técnica recomendada, principalmente por sua capacidade de auxiliar analistas e gestores na avaliação do impacto de suas decisões futuras. Essa abordagem permite uma análise prévia, antes da implementação efetiva, proporcionando uma visão antecipada das consequências das ações planejadas (Gennaro *et al.*, 2017).

Os principais métodos para conduzir um estudo de simulação incluem a Simulação de Eventos Discretos (SED), a Simulação Baseada em Agentes (SBA), a Simulação Dinâmica (SD), a Simulação de Monte Carlo (SMC) e a simulação híbrida (Sumari *et al.*, 2013; Jeon; Kim, 2016; Scheidegger *et al.*, 2018; White; Ingalls, 2018). A SMC destaca-se em resolver desafios de natureza econômica, especialmente na necessidade de estimar as variações dos cenários em face da complexidade e instabilidade do ambiente econômico. Isso é crucial para obter resultados mais precisos e tomar

decisões mais assertivas (Bernardi, 2002). O estudo realizado por D'Adamo *et al.* (2019) é um exemplo de pesquisa que emprega a SMC para analisar a viabilidade econômica do processo hidrometalúrgico de reciclagem de placas de circuito impresso (componentes dos EEEs). Conforme evidenciado pela seção 2.1 deste estudo, observa-se uma carência de artigos que empregam a SMC para a análise de viabilidade econômica da LR de REEE.

Dessa forma, as questões de pesquisa que este estudo busca responder são: 1) Como modelar utilizando a Simulação de Monte Carlo, a viabilidade econômica da LR de REEE em duas situações, sendo a primeira coleta, pré-tratamento, trituração e venda, e a segunda coleta e venda do REEE inteiro, para ajudar na tomada de decisão? Existe viabilidade econômica na LR de REEE nestas duas situações? 3) Qual a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) emitida pelo transporte associado as situações analisadas? 4) Quantos empregos são gerados nas situações analisadas?

O modelo proposto por este estudo busca apoiar empreendedores interessados em estabelecer estações economicamente viáveis de LR de REEE. Já os resultados desta dissertação oferecem *insights* sobre o contexto, fornecendo orientações para o planejamento de unidades de reciclagem de REEE, apoiando nas tomadas de decisões.

1.1 Objetivo geral e específicos

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver um modelo matemático e empregar a Simulação de Monte Carlo (SMC), para avaliar a viabilidade econômica da LR aplicada aos REEEs, em duas situações. A primeira situação envolve apenas a coleta e venda das peças inteiras dos REEEs, referida como RInt; enquanto a segunda inclui a coleta, pré-tratamento, trituração e venda, designada como RDesmont.

O modelo proposto será colocado em prática por meio de uma empresa especializada em gestão de Resíduos de Serviço de Saúde (RSS) e resíduos industriais localizada no sul de Minas Gerais.

Para atingir o objetivo geral foram considerados os seguintes objetivos específicos:

- Construir o fluxo de caixa descontado para as situações RInt e RDesmont;
- Identificar a situação mais viável economicamente entre RInt e RDesmont;
- Determinar a quantidade de REEE que deve ser coletada em ambas as situações, a fim de torná-las viáveis economicamente;

- Quantificar as emissões de CO₂ provenientes do transporte;
- Quantificar a geração de empregos em ambas as situações analisadas.

1.2 Justificativa

A relevância do tema é evidenciada pelos expressivos números: dos 53,6 milhões de toneladas de REEEs gerados em todo o mundo em 2019, apenas 17,40% foram submetidos a processos de reciclagem (Forti *et al.*, 2020). A gravidade da situação é acentuada pela projeção de duplicação da quantidade de REEE até o ano de 2050 (Parajuly *et al.*, 2019). O Brasil está entre os maiores geradores de REEE no mundo, ocupando a quinta posição, ao lado de países como China, Estados Unidos e Japão. Em 2019, estima-se que o Brasil tenha produzido aproximadamente 2,143 milhões de toneladas de REEE (Forti *et al.*, 2020), sendo que somente 3,6% desse total foi reciclado (Dias *et al.*, 2022). Estes números ressaltam a urgência de implementar pesquisas voltadas para a mitigação dos impactos ambientais e a promoção do desenvolvimento sustentável. Visto que a geração de REEE é inevitável, então o ponto de partida de uma EC é a triagem, recolha e reciclagem deste tipo de resíduo. Assim, a presente pesquisa irá contribuir para determinar a quantidade ideal de REEE que deve ser coletada em ambas as situações, RInt e RDesmont, a fim de torná-las viáveis economicamente.

Os REEEs apresentam um potencial econômico significativo, servindo como fonte de receita para empresas do setor de LR, uma vez que dispõem de materiais como prata (Ag), ouro (Au), platina (Pt), cobre (Cu), alumínio (Al), ferro (Fe), plástico, entre outros (Santos, 2020). No entanto, quando esses resíduos são depositados em aterros, os materiais presentes em sua composição são perdidos (Dias *et al.*, 2022). Além disso, é importante ressaltar que os REEEs são compostos por elevadas concentrações de substâncias tóxicas. Caso não sejam adequadamente destinados, esses resíduos têm o potencial de desencadear uma série de impactos negativos, tanto para a saúde humana quanto para o meio ambiente (Gouveia *et al.*, 2019). Portanto, a gestão apropriada e a reciclagem eficiente desses materiais, são essenciais para evitar potenciais danos à saúde pública e ao ecossistema.

A presente pesquisa contribuirá também no cumprimento ao Decreto Federal nº 10.240/2020 que regulamenta a execução do sistema de LR de produtos eletroeletrônicos (BRASIL, 2020). A evolução das leis e regulamentos evidencia uma crescente preocupação com os potenciais impactos ambientais resultantes do descarte de REEE.

Nesse sentido, o desenvolvimento deste projeto nessa área demonstra de forma positiva o alinhamento às atuais preocupações de sustentabilidade do setor, em direção a práticas mais responsáveis e ações que minimizem os impactos negativos.

Além disso, esta pesquisa contribuirá no alcance do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), visto que este estudo busca contribuir para a redução do impacto ambiental negativo nas cidades, concentrando-se na gestão de resíduos, a fim de melhorar as taxas de coleta e reciclagem, e conseqüentemente diminuir as quantidades destinadas aos aterros. A pesquisa também está alinhada com o ODS 12 (Consumo e Produção Sustentável), uma vez que busca alcançar o manejo ambientalmente adequado dos resíduos, e reduzir significativamente a liberação destes na água e no solo, a fim de minimizar seus impactos negativos sobre a saúde humana e ao meio ambiente.

No âmbito acadêmico, conforme detalhado na seção 2.1 da análise bibliométrica, apesar do expressivo volume de pesquisas sobre a LR de REEEs, são escassos os estudos que se dedicam à análise da viabilidade econômica do processo de reciclagem, como destacado por Mairizal *et al.* (2023). O motivo que levou à escolha da ferramenta SMC foi a necessidade de considerar as variações nos cenários, dada a complexidade e instabilidade do ambiente econômico. Embora o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) sejam métodos clássicos para a avaliação de investimentos, é crucial destacar sua natureza determinística, uma vez que consideram fluxos de caixa fixos ao longo do período de vida do projeto (Melo, 2012). A utilização conjunta dos indicadores de viabilidade econômica VPL e TIR, aliados ao emprego da SMC, proporciona resultados mais precisos, e embasa decisões de forma mais assertiva (D'Adamo *et al.*, 2019).

A EC busca minimizar o desperdício e a poluição, promovendo a utilização prolongada dos recursos. Para alcançar esse propósito, é essencial que as práticas sustentáveis sejam não apenas ambientalmente benéficas, mas também economicamente competitivas em comparação com métodos convencionais. Diante disso, a existência de um modelo que proporcione a análise de viabilidade econômica, permite que empresas e governos tomem decisões informadas sobre investimentos em iniciativas sustentáveis, e dessa forma possa impulsionar efetivamente a transição para a EC (D'Adamo *et al.*, 2023). Além de gerar oportunidades de empregos (Forti *et al.*, 2020; D'Adamo *et al.*, 2019).

O presente estudo também busca oferecer suporte a empreendedores interessados em implementar estações de LR de REEE de forma economicamente viável. Visa ser um modelo útil para os tomadores de decisão ao proporcionar uma compreensão do contexto da LR aplicada aos REEEs. Tanto o modelo proposto e os resultados obtidos fornecem diretrizes para o planejamento eficiente de unidades de desmontagem de REEE, contribuindo para práticas mais sustentáveis e responsáveis no gerenciamento destes resíduos.

Os tipos de REEEs abordados nesta pesquisa incluem (3) os resíduos de equipamentos de tecnologia da informação e (4) os resíduos de equipamentos de informação, som e imagem, conforme classificação detalhada na seção 2.2 deste estudo. A escolha destes resíduos foi fundamentada em sua classificação como resíduos críticos, devido à diversidade de categorias, ao curto ciclo de vida e à frequência elevada de descarte. Estas características tornam a gestão desses materiais um desafio significativo, conforme destacado por Jayasiri, Herat e Kaparaju (2023).

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está estruturado em sete capítulos. O primeiro capítulo é a introdução, no qual se apresenta as considerações iniciais, a partir da contextualização do tema de pesquisa, da exposição do problema, os objetivos, e por fim traz a justificativa da necessidade deste estudo. O segundo capítulo exibe a fundamentação teórica da pesquisa, sendo dividida em seis partes. O capítulo três apresenta os aspectos metodológicos empregados para o desenvolvimento desta pesquisa, como a classificação com relação a natureza, a abordagem e ao método.

O capítulo quatro abrange o desenvolvimento da modelagem e simulação, percorrendo as fases de conceitualização, modelagem, solução pelo modelo e implementação. Os resultados da simulação são apresentados no capítulo cinco. O capítulo seis traz a análise dos resultados, enquanto o capítulo sete contém as conclusões, e são propostas diretrizes para trabalhos futuros. Posteriormente, são incluídas as referências bibliográficas de livros, artigos e trabalhos que contribuíram para a construção desta pesquisa e ao final são apresentados os apêndices e anexos.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é abordada a fundamentação teórica que sustenta o presente estudo. Dessa forma, os principais conceitos sobre a LR de REEE, viabilidade econômica e modelagem e simulação são apresentados, a fim de contextualizar este estudo.

2.1 Análise bibliométrica

Em um primeiro momento, buscando identificar e selecionar artigos para constituir a base inicial do conhecimento científico sobre LR de REEE, conduziu-se uma análise bibliométrica. O desenvolvimento desse processo seguiu os cinco passos delineados por Denyer e Tranfield (2009). A pergunta de pesquisa nesta análise bibliométrica preliminar foi: Qual é o estado atual das pesquisas na área de LR de REEEs? A partir dessa questão central, foi possível abordar oito questões secundárias:

- Questão 1: Como está o crescimento das publicações de artigos sobre LR de REEE?
- Questão 2: Quais países pesquisam mais sobre o tema?
- Questão 3: Quais as principais áreas de interesse em LR de REEE?
- Questão 4: Quais são as palavras-chave usadas para iniciar uma pesquisa sobre o tema?
- Questão 5: Quais são as metodologias de pesquisa adotadas?
- Questão 6: Quais são os tipos de resíduos eletrônicos mais pesquisados?
- Questão 7: Quais são as principais questões/temas abordados na LR de REEE pela comunidade acadêmica?
- Questão 8: Quais são as lacunas existentes?

Para essa análise, a base de dados *Scopus* foi consultada, por ser considerada uma das fontes mais relevantes de estudos revisados (Fagnoli; Minicis; Tronci, 2014). As palavras-chave empregadas na busca foram "*reverse logistics*" pela sua natureza genérica e abrangente, e "*electronic waste*" para uma delimitação mais específica do tema. As aspas e o operador booleano "*and*" foram utilizados nas palavras-chave. A busca ocorreu em novembro de 2022, abrangendo o período de 2007 a 2022, e resultou em 145 publicações, permitindo a realização das primeiras análises e a resposta às questões 1, 2, 3 e 4.

Dos 145 artigos selecionados, foi conduzido um levantamento da quantidade de publicações por ano. Observa-se que os últimos cinco anos respondem por 51,72% do total de publicações. O ano de 2020 destaca-se, registrando o maior número de artigos sobre o tema, representando um aumento de 21,05% em comparação à média dos primeiros cinco anos de análise. Entre os dez países com o maior número de artigos publicados, a China lidera a posição. Nota-se que o continente asiático predomina em termos de quantidade, com China, Indonésia, Índia, Irã e Turquia, este último euro-asiático. Em seguida, tem o continente europeu, representado pelo Reino Unido, Grécia e Turquia; a América, com o Brasil e os Estados Unidos; e por último a Oceania com a Austrália. O continente Africano foi o único não representado neste ranking.

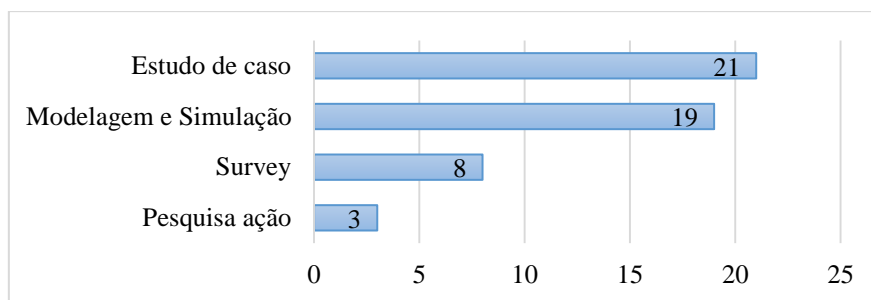
A China, líder na geração de resíduos, destaca-se como o país que mais investe em pesquisas sobre a LR de REEE, conforme confirmado por Albuquerque *et al.* (2021), no qual destacam a posição do país entre os maiores produtores de *e-waste* no mundo. As áreas mais envolvidas na LR de REEEs são as Ciências Ambientais (23,40%), seguidas pela Engenharia (21,10%), Negócios, Gestão e Contabilidade (10%) e Ciência da Computação (10%). Observa-se que a palavra mais utilizada são "*Reverse Logistics*", "*E-waste*", "*Electronic Waste*", "*WEEE*", "*Recycling*", "*Waste Electrical and Electronic Equipment*", "*Sustainability*", "*Circular Economy*", "*Remanufacturing*" e "*E-waste Management*".

Posteriormente, foram selecionados apenas os artigos em inglês e português, que estavam disponíveis em acesso aberto. Este procedimento foi realizado em janeiro de 2023, adotando a mesma lógica de seleção proposta por Albuquerque *et al.* (2021), no qual foram selecionados os 27 artigos mais citados, os 21 artigos mais recentes e, adicionalmente, foram incorporados mais três artigos relevantes ao tema no ano de 2023, totalizando assim 51 artigos. A partir dessa seleção, foi possível responder às demais questões (5, 6, 7 e 8). Para consolidar as informações selecionadas, os artigos foram registrados no *Mendeley Reference Manager*®, um *software* para gerenciar bancos de dados bibliográficos. Além disso, utilizou-se o *software Microsoft Excel*® para desenvolver a estrutura de classificação dos artigos e conduzir as análises.

Os artigos foram categorizados seguindo a metodologia de pesquisa proposta por Kauark, Manhães e Medeiros (2010). Nesse contexto, os métodos de pesquisa mais empregado foram estudo de caso (41,18%), modelagem e simulação (37,25%). Em conjunto, esses dois métodos representam 78,43% do total, conforme ilustrado no Gráfico

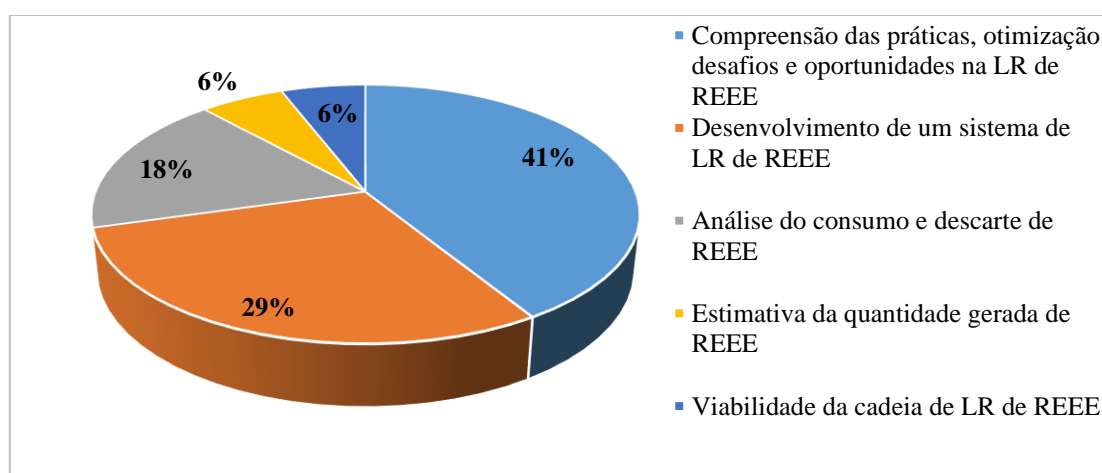
1. Apesar da representatividade significativa da modelagem e simulação com 37,25%, não foram identificados estudos que aplicassem a Simulação Baseada em Agente (SBA).

Gráfico 1 - Métodos de pesquisa mais empregados na LR de REEE



A maioria dos artigos não aprofunda a pesquisa sobre um tipo específico de REEE: 84,31% concentram-se em investigações abrangentes sobre todos os tipos de REEEs; 7,84% dedicam-se exclusivamente a estudos relacionados a dispositivos celulares; 5,88% exploram materiais de tecnologia da informação, enquanto 1,96% abordam questões ligadas a televisão, máquina de lavar, ar-condicionado, geladeira e computador. A busca por pesquisas que delimitassem o tipo específico de REEE é crucial devido à diversidade nas composições dos EEEs, incluindo variações em volumes, peso, consumo, e outros fatores que impactam todo o ciclo de vida, desde a coleta até o armazenamento, transporte, custos e receitas (Cunha; Lima, 2023). Além disso, os artigos foram classificados com base nos temas de pesquisa identificados, dividindo-os em cinco grupos principais, conforme representado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Temas de pesquisa dos estudos



Devido a identificação de escassez de artigos na área de viabilidade econômica da LR de REEE, procedeu-se uma busca combinada de termos relevantes sobre o tema na base de dados da *Scopus*. A análise bibliométrica anterior permitiu aprimorar as

combinações de termos, desta forma, foram pesquisados os seguintes termos: "*reverse logistics*" OR "*circular economy*" AND "*electronic waste*" OR "*e-waste*" OR "*waste electrical and electronic equipment*". Além disso, termos relacionados à aplicação de técnicas de engenharia econômica foram incluídos, tais como: "*economic-feasibility*" OR "*economic-analysis*" OR "*techno-economic analysis*" OR "*economies of scale*".

A consulta foi efetuada no dia 21 de novembro de 2023, abrangendo o intervalo de 2016 a 2023. Todos os termos foram investigados em todos os tipos de documentos, resultando na identificação de 37 publicações. Dentro deste conjunto foram analisados o título, o resumo, a metodologia e a conclusão. Ao término dessa revisão, 18 trabalhos foram excluídos devido à inacessibilidade ou por não abordarem o tema em questão, resultando em 19 artigos para análise.

Essa análise bibliométrica buscou investigar em quais etapas da LR de REEE estão sendo analisadas a viabilidade econômica. O foco também foi direcionado para identificar os métodos, técnicas, indicadores e *softwares* utilizados na avaliação dessa viabilidade. Adicionalmente, a pesquisa buscou analisar se os estudos dentro desse mesmo contexto empregam distribuições estatísticas para representar as oscilações das variáveis. Os resultados obtidos foram sistematizados no Quadro 1.

Ao examinar o Quadro 2, destaca-se que há uma maior concentração de estudos nos processos de extração de metais preciosos, abordando técnicas como pirometalurgia, hidrometalurgia, lixiviação, entre outras. Observa-se que o método mais frequentemente empregado foi o fluxo de caixa, e apenas cinco estudos mencionaram explicitamente os *softwares* utilizados no desenvolvimento da pesquisa, destacando-se *MS Excel*®, *J-Electre-v3.0*®, *LSM TEA Full*® e um *software*, não especificado, baseado em SMC.

Nota-se que apenas um estudo fez uso da técnica de SMC. Esses achados ressaltam a necessidade de uma maior transparência na divulgação dos métodos e ferramentas empregados em estudos de viabilidade econômica no âmbito da LR de REEE. Além disso, constatou-se que apenas 16% dos artigos analisados utilizaram distribuições estatísticas como meio de representar as oscilações das variáveis.

Quadro 2 - Artigos na literatura sobre a viabilidade econômica da LR de REEE

| Autores | Processo | Método Técnica Indicador | Software | Distribuição estatística |
|---------------------------------|---|--|---|---------------------------------|
| Deng <i>et al.</i> (2023) | Pré-tratamento e lixiviação | <i>Techno-economic assessment (TEA)</i> | <i>LSM TEA Full®</i> | Sim |
| Reinhart <i>et al.</i> (2023) | Pré-tratamento e processo de pirometalurgia | <i>Total Cost of Ownership (TCO)</i> | - | Não |
| D'Adamo <i>et al.</i> (2023) | Pré-tratamento, trituração, processos químicos e recuperação de materiais | Fluxo de Caixa Descontado (FCD) e Valor Presente Líquido (VPL) | - | Não |
| Mairizal <i>et al.</i> (2023) | Pré-tratamento e pirometalurgia | <i>Techno-economic assessment (TEA)</i> ; Fluxo de Caixa Descontado (FCD); Taxa de Retorno do Fluxo de Caixa Descontado (TRFCD); Taxa Interna de Retorno (TIR); VPL e período de retorno | <i>MS Excel</i> | Não |
| Sales, Amorim e Souza (2023) | Pré-tratamento | Multicritério ELECTRE TRI | <i>J-Electre-v3.0 e MS Excel</i> | Não |
| Cozza, D'Adamo e Rosa (2023) | Coleta, pré-tratamento e pré-processamento | Análise de Custos de Ciclo de Vida (ACCV); Fluxo de Caixa; VPL e Período de retorno descontado | - | Não |
| Castro <i>et al.</i> (2022) | Desmontagem, pré-tratamento térmico, lixiviação e precipitação | Custos e receitas | - | Não |
| Magrini e Jagodzinska (2022) | Desmagnetização, trituração e biolixiviação | Contabilidade de Custos de Fluxo de Materiais (CCFM) | - | Não |
| Thompson <i>et al.</i> (2021) | Pré-tratamento, lixiviação e precipitação | Análise Retroeconômica dos custos e receitas | - | Não |
| Hischier e Boni (2021) | Reutilização | Custo Total de Propriedade (TCO) | <i>MS Excel</i> | Não |
| Peiró, Girón e Durany (2020) | Desmontagem | <i>Ease of Disassembly Metric (eDiM)</i> , custos e receitas | - | Não |
| Boundy (2020) | Coleta, desmontagem e processamento | Fluxo de Caixa e TIR | - | Não |
| Feng <i>et al.</i> (2019) | Remanufatura | Teoria do jogo Stackelberg e solução de equilíbrio de Nash | - | Não |
| D'Adamo <i>et al.</i> (2019) | Hidrometalurgia | Fluxo de Caixa Descontado (FCD), VPL e SMC | <i>Software, não especificado, baseado em SMC</i> | Sim |
| Zeng, Mathews e Li (2018) | Extração de metais | Processo Hierárquico Analítico e <i>Learning Curve</i> | - | Não |
| Richa, Babbitt e Gaustad (2017) | Reutilização | Custos e receitas | - | Não |
| Cucchiella <i>et al.</i> (2016) | Pré-tratamento e refino | Fluxo de Caixa Descontado (FCD), VPL e Período de Retorno Descontado | - | Sim |
| Choi e Fthenakis (2010) | Coleta | Modelo matemático que considera: custos totais, despesas de transporte e investimento de capital necessário | - | Não |
| Li e Liu (2010) | Coleta, pré-tratamento e processamento | Modelo matemático abordando custo e lucro | - | Não |

2.2 Resíduos de equipamentos elétricos eletrônicos

Os Equipamentos Elétricos e Eletrônicos (EEEs) são produtos que dependem do uso de correntes elétricas ou campos eletromagnéticos para operar (Sales; Amorim; Souza, 2023). A Associação Brasileira dos Produtores de Produtos Eletrônicos (2013) classifica o EEE em cinco categorias: (1) produtos da linha branca e grandes eletrodomésticos, como por exemplo, congeladores, máquinas de lavar roupas, micro-ondas, aparelhos de ar-condicionado, etc.; (2) pequenos eletrodomésticos, como varredores de tapetes, torradeiras, moedores, máquinas de café, secador do cabelo, entre outros (Guarnieri; Silva; Levino, 2016); (3) equipamentos de tecnologia da informação, como computadores, notebooks, telefones, celulares; (4) equipamentos de informação, som e imagem, como por exemplo, aparelhos de rádio, câmeras de vídeo, gravadores de vídeo; (5) pilhas e lâmpadas, como baterias domésticas, automotivas, de computadores e celulares, baterias industriais, lâmpadas fluorescentes e incandescentes e de LED (Guarnieri; Silva; Levino, 2016). Neste estudo, foram abordados os EEE do tipo 3 e 4.

Os termos Resíduo de Equipamento Eletroeletrônico (REEE) ou *e-waste*, são usados para denominar todo o tipo de EEE e suas peças, que foram descartadas sem a intenção de reutilização, ou seja, quando atingem o fim da sua vida útil (Parajuly *et al.*, 2019). Os REEEs são classificados e inspecionados para recuperação dos produtos, componentes e materiais, portanto conforme a qualidade, os REEEs serão reparados, reformados, reciclados ou descartados (Koshta; Patra; Singh, 2021). A geração de REEE varia de acordo com a região, em 2019, a Ásia foi o continente com maior geração, atingindo 24,9 milhões de toneladas (Mt) (5,6 Kg per capita por ano), seguida pelas Américas com 13,1 Mt (13,3 Kg per capita por ano), Europa com 12 Mt (16,2 Kg per capita por ano), África com 2,9 Mt (2,5 Kg per capita por ano) e a Oceania com 0,7 Mt (16,1 Kg per capita por ano) (Forti *et al.*, 2020). Apesar da Ásia ser o continente com maior produção de REEE, a Europa assume a primeira colocação na quantidade gerada por pessoa.

Os REEEs são constituídos por metais preciosos como ouro (Au), prata (Ag), paládio (Pd), platina (Pt), entre outros (Akram *et al.*, 2019; Huisman *et al.*, 2017). Porém, contém também materiais perigosos, como arsênico (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cromo (Cr), mercúrio (Hg), entre outros (Akram *et al.*, 2019). No estudo efetuado por Rocha e Penteadó (2021), em 1 tonelada de REEE coletado a partir do processo de LR, foram recuperados aproximadamente 188 gramas de prata, 6 gramas de ouro e 10 gramas

de paládio. Além disso, o ferro e o aço representaram 48,7% da composição, o plástico 39,5%, alumínio 6,7%, o cobre 4% e o restante dos materiais corresponderam menos de 1%.

Ao serem descartados diretamente no solo os REEEs desencadeiam uma série de efeitos deletérios ao meio ambiente, como poluição, degradação do solo e contaminação das águas (Akram *et al.*, 2019). Em contato com os seres humanos os elementos químicos perigosos presentes nos REEEs podem ocasionar danos à saúde, por exemplo, osteoporose, danos neurológicos, complicações respiratórias e renais, Alzheimer, alergias na pele, câncer no ovário, insuficiência cardíaca, entre outros, conforme Quadro 3 (Xu *et al.*, 2015; Dutta *et al.*, 2023).

Quadro 3 - Malefícios causados pelos elementos dos resíduos de equipamentos elétricos e eletrônicos

| Elemento químico | Equipamento elétrico e eletrônico | Danos à saúde |
|-----------------------------|---|--|
| Mercúrio | Computador, monitor e TV de tela plana | Danos no cérebro e fígado |
| Cádmio | Computador, monitores de tubo e baterias de laptops | Envenenamento, problemas nos ossos, rins e pulmões |
| Arsênio | Celulares | Pode causar câncer no pulmão, doenças de pele e prejudicar o sistema nervoso |
| Berílio | Computadores e celulares | Causar câncer no pulmão |
| Retardantes de Chamas (BRT) | Usado para prevenir incêndios em diversos eletrônicos | Problemas hormonais, no sistema nervoso e reprodutivo |
| Chumbo | Computador, celular e televisão | Causa danos ao sistema nervoso e sanguíneo |
| Bário | Lâmpadas fluorescentes e tubos | Edema cerebral, fraqueza muscular, danos no coração, fígado e baço |
| PVC | Usado em fios para isolar corrente | Se inalado pode causar problemas respiratórios |

Fonte: Ferreira (2008)

Apesar dos REEEs serem um problema devido a presença dos componentes perigosos, eles são ao mesmo tempo uma solução para o esgotamento dos recursos naturais, dos quais os fabricantes de EEE dependem (Herat; Agamuthu, 2012). Portanto, a reciclagem destes resíduos serve como fonte alternativa ou secundária de materiais, como os plásticos e os metais (Tanskanen, 2013).

2.3 Logística reversa dos resíduos de equipamentos elétricos eletrônicos

A Logística Reversa (LR) também denominada como cadeia de suprimentos reversa, é um termo frequentemente usado para se referir ao papel da logística na reutilização, reparo, descarte de resíduos, reciclagem ou destinação final ambientalmente correta, a partir do processo de planejamento, implantação e controle do fluxo de itens e informações (Koshta; Patra; Singh, 2021; Zhou; Wang, 2008; Hugo; Lima, 2021; Rogers; Tibben-Lembke, 2001). A LR é o conjunto de atividades com o objetivo de recuperar o valor dos produtos usados, quebrados ou com defeito (Maheswari; Yudoko; Adhiutama, 2018).

A partir do processo de LR é possível transformar parte dos REEEs em matérias primas e retorná-las aos processos de fabricação, a fim de que possam novamente fazer parte da composição de outros produtos, evitando a extração da natureza (Agrawal; Singh; Murtaza, 2015; Xavier *et al.* 2020). Em síntese, na LR os REEEs emergem como uma alternativa viável para atender à demanda futura de materiais, ao mesmo tempo em que contribuem para reduzir a dependência de recursos naturais. Portanto, a LR busca mitigar impactos ambientais e riscos à saúde pública associados ao descarte inadequado de resíduos, além de proporcionar ganhos econômicos (Kilic; Cebeci; Ayhan, 2015).

A LR pode ser considerada uma ferramenta essencial para facilitar o fechamento do ciclo de um produto ou material. Dentro desse contexto, a EC fundamenta-se na utilização da LR, permitindo que os resíduos gerados por produtos no final de sua vida útil ou durante processos de manutenção, retornem aos ciclos produtivos. Esse processo não apenas contribui para reduzir o desperdício, mas também promove uma gestão mais sustentável dos recursos, alinhada a um dos princípios da EC (Almeida *et al.*, 2022).

As iniciativas de LR têm o potencial de afetar os envolvidos em termos de fatores ambientais, sociais e econômicos, conhecidos como *Triple Bottom Line* (TBL) (Nardi, 2013). Em 1994, John Elkington introduziu o conceito do TBL, visando promover o equilíbrio entre questões econômicas, ambientais e sociais nas operações (Arbachi; Guarany, 2021). No contexto da LR de REEE, Leite (2017) destaca oportunidades econômicas na LR, ressaltando a obtenção de benefícios financeiros a partir da recuperação de matérias primas secundárias dos canais reversos de reciclagem.

Em termos sociais, influencia ao contribuir para a geração de empregos e renda por meio da atividade de reciclagem. Quanto aos benefícios ambientais destacam-se na

redução da poluição do solo, da água e do ar, no prolongamento da vida útil dos aterros sanitários, na redução de resíduos sólidos, e na possível prevenção da escassez de recursos ambientais. No entanto, para concretizar os benefícios econômicos, sociais e ambientais, é imprescindível ter atividades de LR estruturadas de forma coerente (Bezerra; Freitas, 2017).

O Sistema de Logística Reversa (SLR) destinado aos REEEs desempenha um papel crucial na mitigação do impacto do descarte inadequado dessa categoria de resíduos, caracterizada por sua complexidade e diversidade. Contudo, a implementação do SLR também apresenta impactos potenciais, principalmente durante o transporte, devido à prevalência contínua do uso de combustíveis fósseis, resultando em emissões substanciais como o dióxido de carbono (CO_2) o principal gás do efeito estufa (Ottoni *et al.*, 2021).

As emissões de poluentes de um conjunto de veículos automotores podem ser categorizadas como provenientes de fontes em linha ou em fonte área. Uma via, como uma rodovia ou avenida, é classificada como fonte em linha. Por outro lado, uma região com uma circulação intensa de veículos, como o centro de uma cidade, é considerada uma fonte em área. Esta pesquisa concentra-se no transporte rodoviário, onde as emissões de poluentes são classificadas como fontes em linha, ou seja, originadas de locais como rodovias ou avenidas. O poluente considerado foi o dióxido de carbono (CO_2). A Equação 1 apresenta a metodologia para calcular as emissões provenientes da fonte em linha (Cancelli; Dias, 2014).

$$E_{linha,i} = F_{r,j} * \left(\frac{F_{e,i}}{1000} \right) * L \quad (1)$$

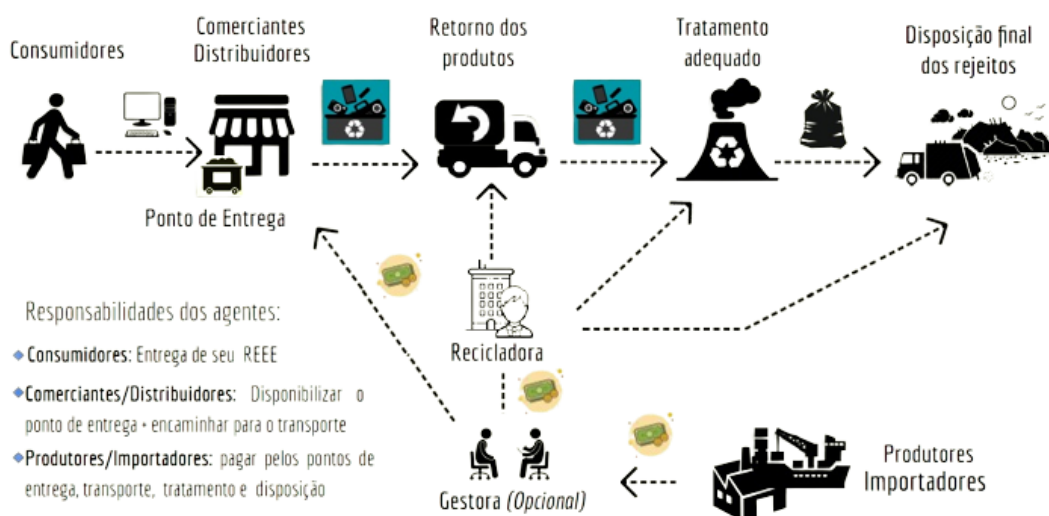
Em que:

- $E_{linha,i}$: Quantidade total do poluente, em fonte tipo linha, do poluente i emitido;
- $F_{r,j}$: Número total de veículos (F_r), de carga j que circulam na via de interesse durante um período de tempo t ;
- $F_{e,i}$: Fator de emissão (F_e) do poluente i ($g.Km^{-1}$);
- 1000: Fator de conversão de g para kg;
- L : Comprimento total em quilômetros (km).

Conforme apontado por Leite (2017), os canais de distribuição reversa se dividem predominantemente em duas categorias: pós-venda e pós-consumo. O pós-venda refere-se a produtos com pouco ou nenhum uso que retornam à empresa devido a questões como problemas de qualidade. Por outro lado, o pós-consumo abrange produtos descartados após o término de sua utilização original e se subdivide em três subsistemas: reuso, remanufatura e reciclagem. Quando não é possível empregar um dos três subsistemas mencionados, os produtos, materiais e resíduos de pós-consumo são encaminhados para o processo de destinação final, sendo direcionados para aterros sanitários tecnicamente controlados ou sujeitos à incineração. Do ponto de vista ecológico, o processo de destinação final é considerado seguro, conforme apontado por Leite (2017). Diante do que foi exposto, o presente estudo trata de resíduos de pós-consumo enquadrando no subsistema de reciclagem e destinação final.

O ciclo da LR de REEE tem início com o usuário final, que realiza o descarte dos resíduos em um ponto de coleta. Posteriormente, o responsável pelo transporte encaminha o resíduo para uma recicladora autorizada ou para um local de tratamento designado. Se o REEE é direcionado a uma recicladora, passa por um processo de transformação em matéria prima e é reintegrado à composição de novos produtos. Entretanto, quando o REEE é encaminhado para um local de tratamento, os rejeitos, após o devido tratamento são enviados para um local de destinação ambiental adequado, conforme Figura 1 (Xavier *et al.*, 2020).

Figura 1 - Sistema de logística reversa de REEE



Fonte: Xavier *et al.* (2020)

A etapa de pré-processamento na reciclagem de REEE compreende uma série de atividades destinadas a preparar os materiais descartados para os próximos estágios da reciclagem (Xavier *et al.* 2020). Essa fase é crucial para ajudar na recuperação de componentes valiosos e possibilitar a separação eficaz de substâncias prejudiciais, maximizando a eficiência e a qualidade da reciclagem (Wang; Li; Xia, 2016; Forti *et al.*, 2020). O pré-tratamento de REEE envolve um conjunto de processos que incluem a triagem, desmontagem e separação mecânica de materiais (Sales; Amorim; Souza, 2023). Na triagem, os materiais são classificados para facilitar o manuseio, enquanto que a desmontagem separa cuidadosamente partes dos EEEs. A separação mecânica, por sua vez, categoriza materiais com base em características físicas, sendo crucial para a recuperação eficiente de metais, plásticos e outros recursos valiosos. Após a conclusão do processo de pré-tratamento, certos materiais, como o plástico e as placas de circuito impresso, são submetidos ao processo de trituração, conforme Figura 2 (Xavier *et al.* 2020).

Figura 2 - Pré-processamento de REEE e trituração



Fonte: Xavier *et al.* (2020)

No contexto de qualquer processo, o Takt Time desempenha um papel crucial, estabelecendo o ritmo essencial para atender à demanda de maneira eficiente, promovendo um fluxo contínuo e reduzindo desperdícios. Essa métrica ajuda a sincronizar as operações e a alocação de recursos, mantendo a produção alinhada com as necessidades do mercado (Rother; Shook, 2003). De acordo com Alvarez e Antunes Junior (2001) o *Takt-Time* (TT) é estabelecido considerando a demanda do mercado e o tempo disponível para a produção, representando o ritmo necessário de produção em um

intervalo específico para atender à demanda correspondente a esse mesmo período, conforme Equação 2. Essa métrica essencial proporciona a sincronização adequada entre a capacidade de produção e as exigências do mercado (Rother; Shook, 2003).

$$TT = \frac{\text{Tempo de produção disponível no período } p}{\text{Número de produtos pedidos no período } p} \quad (2)$$

Para colocar em prática a cadeia de LR é necessário a integração de diferentes partes interessadas, a fim de superar obstáculos como a falta de conscientização, ausência de dados, a carência de conhecimento técnico e a existência de um mercado de reciclagem ilegal (Bernardo *et al.*, 2023; Cunha *et al.*, 2023; Bernardo; Lima, 2017; Santos; Ogunseitan, 2022). Outros fatores que contribuem para a eficiente adoção das práticas de LR pelas empresas incluem, a crescente preocupação ambiental, a busca por competitividade sustentável, a melhoria da imagem corporativa, a realização de ganhos econômicos e a implementação de legislações (Agrawal; Singh; Murtaza, 2015).

Diversas legislações em todo o mundo foram implantadas com o objetivo de estimular o processo de LR e reduzir as substâncias perigosas nos REEE (Rocha; Pentead, 2021). Como por exemplo na União Europeia (UE), há a Diretiva 2012/19/EU no qual aborda questões relacionadas aos REEEs, visando proteger e melhorar a saúde humana, a qualidade ambiental, além de promover o uso prudente e racional dos recursos naturais (EUROPEAN UNION, 2012). Paralelamente, existe a Diretiva 2011/65/EU, também conhecida como RoHS, em que restringe o uso de substâncias perigosas na fabricação de EEE (EUROPEAN UNION, 2011).

No Japão, há a Lei de Promoção da Utilização Eficaz de Recursos (LPUR), que fortalece medidas de reciclagem de produtos usados, com o objetivo de reduzir a produção de resíduos para preservar os recursos e estender a vida útil dos produtos (JAPAN, 2001a). Além disso, existe a Lei de Reciclagem de Tipos Específicos de Eletrodomésticos (LRHA), que busca o tratamento adequado dos REEEs e promove a utilização eficiente dos recursos (JAPAN, 2001b). Nos Estados Unidos, embora não exista uma legislação federal abrangente sobre o assunto, 25 dos 50 estados possuem leis específicas para impulsionar a reciclagem de REEE (Rocha; Pentead, 2021). Um exemplo é a Lei *Electronics Take Back* (ETBC) de Michigan, que visa fomentar a reutilização e a reciclagem adequada de eletrônicos (EGLE, 2022).

No Brasil existe a Lei Federal nº 12.305/2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), no qual estabelece princípios, diretrizes e ações direcionadas para alcançar a gestão ambientalmente adequada dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010). A PNRS estimula práticas que busquem a não geração, a redução na fonte, a reutilização e a reciclagem dos resíduos sólidos, promovendo o uso sustentável dos recursos. Busca pela destinação final ambientalmente correta dos resíduos, prevenindo impactos negativos sobre o meio ambiente e a saúde pública (BRASIL, 2010).

A PNRS estabelece a responsabilidade compartilhada entre fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes na gestão dos resíduos, promovendo a coleta seletiva, a LR e a destinação final correta. Estimula a adoção de práticas relacionadas à EC, buscando a otimização do ciclo de vida dos produtos e a redução do desperdício. Incentiva a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias e processos que contribuam para a gestão sustentável dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010).

A PNRS determina a obrigatoriedade da implementação do sistema de LR de determinados resíduos, incluindo: i) resíduos e embalagens de agrotóxicos; ii) pneus; iii) pilhas e baterias; iv) resíduos e embalagens de óleos lubrificantes; v) lâmpadas fluorescentes, de vapor de sódio, mercúrio e de luz mista; vi) produtos eletrônicos e seus componentes. Para complementar a PNRS, foi promulgado o Decreto Federal nº 10.240/2020 que regulamenta a implementação de sistema de LR de produtos eletroeletrônicos (BRASIL, 2020). Este decreto estimula a implementação de sistemas de coleta, com foco na reciclagem e na valorização dos resíduos, bem como reforça a importância da fiscalização e monitoramento constante para garantir o cumprimento das normas relacionadas à gestão de resíduos (BRASIL, 2020).

De acordo com Sales, Amorim e Souza (2023) uma quantidade de REEE é recolhida por empresas de LR, que comercializam materiais nos mercados nacional e internacional de reciclagem. Outra parte considerável é coletada informalmente por catadores, sendo vendida a comerciantes de sucata. No entanto, uma parcela significativa ainda acaba sendo destinada a aterros sanitários. No Brasil, por exemplo, a coleta formal de recicláveis é predominantemente conduzida pelos municípios, empresas privadas (sejam coletoras ou recicladoras) e/ou cooperativas e associações de catadores, frequentemente atuando em colaboração (CEMPRE, 2019).

Contudo, a maior parte dos REEEs é canalizada a partir do setor informal, envolvendo catadores, cooperativas irregulares, sucateiros, esta dinâmica não é exclusiva ao Brasil, estendendo-se a outros países (Valente *et al.*, 2021; Souza *et al.*, 2016). Alguns desses atores informais adotam práticas perigosas ao separar componentes valiosos, descartando as partes menos valiosas em lixões, áreas verdes e terrenos baldios. Esses catadores desempenham serviços frequentemente desvalorizados, enfrentando condições precárias de trabalho. Uma intervenção, especialmente por parte do governo, é fundamental para fomentar práticas ambientalmente sustentáveis (Souza *et al.*, 2016).

A Europa é o continente com o maior registro formal de REEE coletado e devidamente reciclado, conquistando uma taxa de 42,5%, equivalente a 5,1 milhões de toneladas (Mt), seguida pela Ásia com 11,7%, (2,9 Mt), Américas com 9,4% (1,2 Mt), Oceania com 8,8% (0,06 Mt) e África com 0,9% (0,03 Mt) (Forti *et al.*, 2020). Embora a Europa conquiste uma taxa de 42,5% de reciclagem, os demais continentes registram índices consideravelmente mais baixos.

Além da perspectiva de conservação e maximização dos recursos, a geração de receitas tem sido o principal impulsionador por trás da prática de reciclagem REEEs (Mairizal *et al.*, 2023). Uma gestão eficiente dos REEEs não apenas pode impulsionar o mercado de reciclagem, mas também proporcionar oportunidades de negócios lucrativas em termos econômicos, gerar mais empregos, entre outros benefícios (Forti *et al.*, 2020; D'Adamo *et al.*, 2019). O desenvolvimento e a aplicação bem-sucedidos do processo de reciclagem de REEEs em um país dependem da viabilidade econômica deste processo (Mairizal *et al.*, 2023).

2.4 Análise de viabilidade econômica de projetos

A análise de viabilidade econômica de um projeto objetiva avaliar a tomada de decisão sobre o tipo de investimento analisado. De acordo com os resultados do estudo identifica-se a viabilidade de implantação do projeto, e caso seja viável, o capital investido retornará ao investidor (Correia Neto, 2009). O aumento na expansão de projetos de investimentos exige que o investidor realize um levantamento dos recursos disponíveis e analise a maneira mais eficaz de aplicá-los, visando atingir um resultado econômico-financeiro atrativo (Assis, 2010).

Métodos e demonstrativos, como a Demonstração do Resultado do Exercício (DRE), desempenham um papel crucial nesse processo, fornecendo suporte nas tomadas

de decisões (Assis, 2010). A DRE de uma entidade expõe a composição do lucro ou prejuízo, revelando a diferença entre as receitas e as deduções, custos, despesas, além do imposto de renda (Sousa; Carvalho; Nascimento, 2023). De acordo com Marion (2003, p. 127) “a DRE é extremamente relevante para avaliar o desempenho da empresa e a eficiência dos gestores em obter resultado positivo. O lucro é o objetivo principal das empresas”.

Esses requisitos garantem uma apresentação clara e transparente das informações financeiras das empresas, seguindo as normativas estabelecidas pela legislação vigente. Já o Fluxo de Caixa (FC), por outro lado, consiste no registro e controle das entradas e saídas de recursos financeiros em uma organização ao longo de um período específico. Essa prática possibilita um controle mais preciso das operações que envolvem o capital disponível (Gimenes; Francisco; Silva, 2011).

Dependendo das características do projeto, diferentes tipos de indicadores de viabilidade econômica podem ser empregados, como por exemplo, o *Payback*, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), entre outros. Neste estudo são utilizados o VPL e a TIR. O VPL é denominado também por valor atual líquido ou fluxo de caixa descontado (Ferreira, 2009). De acordo com Souza (2003, p. 74), o VPL é “a diferença entre o valor presente das entradas líquidas de caixa associadas ao projeto e o investimento inicial necessário”. Lemes Júnior, Rigo e Cherobim (2002) afirmam que o valor do VPL é obtido subtraindo do valor inicial de um projeto, o valor presente das entradas líquidas do caixa, retirada a uma taxa igual ao custo do capital do empreendimento. Conforme Zanin e Bagatini (2012), o VPL é um método de análise de investimento em projeto com maior utilização por profissionais de finanças, pela a facilidade de interpretação dos resultados, algo que é corroborado por Ferreira (2009).

O investimento será considerado com retorno positivo se o VPL resultar em um valor positivo, indicando que realizar o investimento é equivalente a receber um pagamento correspondente ao seu valor. Porém, caso o VPL resulte em um valor negativo, sugere-se a rejeição do investimento. Isso porque, nesse contexto, indica que os custos são maiores do que os benefícios esperados. Isso sugere que o investimento não é recomendado, pois não adiciona valor ao projeto ou negócio. Portanto, o VPL se torna um critério simples para decidir se um projeto deve ou não ser realizado (Lemes Júnior; Rigo; Cherobim, 2002). O VPL reflete o benefício líquido atualizado do projeto, sendo expresso pela Equação 3:

$$VPL = \sum_{i=1}^n R_i(1+r)^i - \sum_{i=1}^n K_i(i+r)^i \quad (3)$$

Em que:

- R_i : receita no período i ;
- K_i : custo no período i ;
- r : taxa de desconto considerada; e
- i : horizonte de planejamento do investimento.

A TIR de um fluxo de caixa é a taxa de juros necessária para que o valor do VPL seja igual a zero, é uma taxa intrínseca ao projeto, pois depende somente das entradas e saídas de caixas (Casarotto Filho; Kopittke, 2010). Ou seja, a TIR é a taxa de juros na qual o projeto se torna aceitável conforme o valor da Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Dessa forma, se a taxa de juros de oportunidade superar a TIR, o VPL resultará em um valor negativo. Essa relação é crucial para avaliar a atratividade do investimento (Sousa; Carvalho; Nascimento, 2023).

Deve-se comparar o valor obtido da TIR com TMA, assim para aceitar um investimento, a TIR deve ser maior do que a TMA, indicando que a taxa de retorno do projeto é superior ao custo de oportunidade (Dassi *et al.*, 2015). Segundo Gitman (2010) a TIR pode ser calculada conforme Equação 4.

$$\sum_{i=1}^n \frac{FC_i}{(1+TIR)^i} = FC_0 \quad (4)$$

Em que:

- FC_i : fluxo de caixa no período i ;
- TIR : Taxa Interna de Retorno; e
- FC_0 : fluxo de caixa no período 0.

Segundo Casarotto Filho e Kopittke (2010) calcular a taxa interna de retorno é um processo que demanda sucessivas aproximações, logo não é algo muito simples. Por essa razão, este estudo empregou a ferramenta *Microsoft Excel*® para facilitar o cálculo da TIR.

A TMA é a taxa mínima estabelecida pelo próprio investidor como orientação para a remuneração do capital, ou seja, é o retorno total exigido ao projeto em análise

(Macedo; Albuquerque; Morales, 2017). De acordo com Casarotto Filho e Kopittke (2010), ao avaliar propostas de investimento, é vital considerar a perda de oportunidade para ganhos alternativos. Para ser atrativa, a nova proposta deve render pelo menos a TMA, equivalente à rentabilidade de aplicações seguras de baixo risco.

A TMA pode ser obtida a partir do cálculo do Custo Médio Ponderado de Capital (CMPC), também denominado *Weighted Average Cost of Capital* (WACC). Para o cálculo do WACC é preciso compreender que o capital de uma empresa é formado pelo capital de terceiros, que representa os empréstimos recebidos e pelo capital próprio, que são os recursos obtido pelos sócios. Portanto o custo de capital reflete o custo da dívida e do capital próprio na proporção utilizada para financiar o investimento (Casarotto Filho; Kopittke, 2010). Dessa forma, o WACC em seu cálculo necessita do custo da dívida líquido de impostos e do custo de capital próprio, nos quais devem ser ponderados pelo peso de cada um deles. Logo esse método procura refletir o custo médio das diferentes alternativas de financiamentos disponíveis para o investimento, conforme Equação 5 (Macedo; Albuquerque; Morales, 2017).

$$WACC = \frac{D}{D + E} (1 - T_m)(K_d) + k_e \frac{E}{D + E} \quad (5)$$

Em que:

- WACC: custo médio ponderado de capital;
- D : valor de mercado das dívidas (*debt*);
- E : valor de mercado do capital próprio (*equity*);
- T_m : taxa marginal de imposto;
- K_d : custo de capital de terceiros;
- K_e : custo do capital próprio.

O modelo de Custo de Capital Próprio também é conhecido como *Capital Asset Pricing Model* (CAPM). De acordo com os estudos de Welch (2008), o CAPM é o modelo mais aplicado para estimar o custo do capital próprio (K_e), seu cálculo é definido pela Equação 6. Para o cálculo do K_e são necessários os valores do beta desalavancado e do beta alavancado. O beta de uma carteira de investimentos é a média ponderada dos betas dos componentes, como as dívidas e o capital próprio. Dessa forma, para a empresa há um beta de seus ativos, um beta de suas dívidas e um beta de seu capital próprio (Tomazoni; Menezes, 2002).

$$CAPM = K_e = R_f + \beta_L(R_m - R_f) \quad (6)$$

Em que:

- K_e : custo de capital próprio;
- R_f : retorno do ativo livre de risco;
- β_L : beta alavancado;
- R_m : retorno esperado para a carteira de mercado.

Quando a empresa não apresenta dívidas, o beta desalavancado é igual ao beta do patrimônio líquido, estabelecido apenas pelas receitas e pelo nível de alavancagem operacional. Já quando a empresa está endividada, a relação $\frac{E}{D+E}$ é menor que um, mostrando que o beta dos ativos é menor do que o beta do capital próprio (denominado beta alavancado) Equação 7 (Damodaran, 1999, p.71).

$$\beta_L = \beta_u \left[1 + \frac{D(1-t)}{E} \right] \quad (7)$$

Em que:

- β_L : beta alavancado;
- β_u : beta desalavancado;
- t : alíquota do IR e da contribuição social sobre o lucro;
- D : valor de mercado das dívidas (*debt*);
- E : valor de mercado do capital próprio (*equity*).

Já o custo de capital de terceiros (K_d) é o retorno exigido pelos credores da dívida da empresa detentora do ativo, a partir da avaliação do negócio e do desempenho da empresa. O Custo Médio Ponderado de Capital da dívida estima o custo de capital de terceiros a partir da soma da taxa de retorno do ativo livre de risco (R_f), do prêmio de risco de crédito (*spread*) (R_c) e do prêmio pelo risco do país (Brasil) (R_p) (Tomazoni; Menezes, 2002), conforme Equação 8.

$$K_d = R_f + R_c + R_p \quad (8)$$

O conceito de risco surge quando eventos futuros podem ser estimados com base em probabilidade. Todo processo de projeção carrega consigo uma parcela de risco associada (Halawa, Abdelalim; Elrashed, 2013). Esses riscos, fundamentalmente, representam a possibilidade das projeções não se materializarem conforme o previsto, levando a resultados distintos dos antecipados. Uma abordagem para realizar projeções de fluxos de caixa levando em conta esses riscos é empregar simulações baseadas no método de Monte Carlo (Clemente; Souza, 2009).

Ao abordar as aplicações da análise de viabilidade econômica, observa-se na literatura que essa abordagem tem sido empregada com sucesso em estudos de LR de REEE, como o estudo desenvolvido por Boundy (2020), no qual elaborou um modelo econômico para estimar a quantidade de resíduos de tela LCD, que poderia ser coletado por uma empresa de reciclagem, a fim de se tornar um processo viável nos Estados Unidos. O foco era otimizar a TIR. O modelo incluiu cálculos do fluxo de caixa, considerando custos de transporte e a massa dos resíduos gerados.

Em seus estudos Boundy (2020), dividiu os custos de processamento entre fixos e variáveis, e calculou a receita. Também considerou os investimentos (CAPEX) e as TIRs para cada estado, adotando um horizonte de planejamento de 10 anos. Ao final do estudo foi identificado que Nova York e Nova Jersey tiveram as TIRs mais altas (15%). A análise de sensibilidade indicou a influência direta do tipo de resíduo na TIR. A capacidade ótima da planta foi estimada entre 10.000 e 12.000 toneladas de material de tela LCD por ano.

Outro estudo foi o realizado por D'Adamo *et al.* (2019), no qual analisaram a viabilidade econômica do processo hidrometalúrgico em pequenas e médias empresas, focando na reciclagem de placas de circuito impresso de REEE na Itália. O projeto analisou a recuperação de 500 toneladas de placas de circuito impresso, de três grupos de placas com diferentes teores de ouro, para isso foi utilizado o método de fluxo de caixa e como indicador de viabilidade econômica o VPL.

D'Adamo *et al.* (2019) utilizaram cenários pessimistas e otimistas, analisando a sensibilidade dos preços dos metais. Os autores adotaram um horizonte de planejamento de 10 anos. O VPL variou de 6,8 a 63 milhões de euros, destacando a influência dos preços do ouro e paládio, além do custo de compra das placas. A análise de risco pelo

método de Monte Carlo confirmou os resultados e ressaltou a complexidade do setor devido à diversidade nos materiais dos REEEs e modelos de negócios.

Mais um estudo na área foi o desenvolvido por Mairizal *et al.* (2023) realizaram uma avaliação técnico-econômica da reciclagem de metais de placas de circuito impresso de resíduos eletrônicos na Austrália, utilizando o processo de pirometalurgia em três cenários distintos. Empregaram indicadores como VPL, TIR e período de recuperação, além da análise de sensibilidade para identificar fatores que afetam a viabilidade. Os dados financeiros foram coletados por revisão de literatura, relatórios e entrevistas.

Os cenários do estudo de Mairizal *et al.* (2023) variaram na capacidade de processamento, com destaque para uma instalação de maior escala (cenário 3) com capacidade de entrada de 100.000 toneladas por ano. Os resultados apontaram que o cenário 3 obteve o VPL mais alto (A\$ 1.248 milhões), indicando maior viabilidade econômica. A análise de sensibilidade destacou a importância da composição da matéria-prima e dos preços de mercado dos metais na rentabilidade do projeto. O custo de transporte e a composição das placas também foram identificados como fatores críticos na análise econômica.

Já Cuchiella *et al.* (2016) desenvolveram um modelo econômico para a recuperação de placas de circuito impresso automotivas na Itália. Foi utilizado a ferramenta fluxo de caixa, os indicadores de viabilidade econômica VPL e o tempo de retorno. Realizaram análise de sensibilidade considerando variáveis críticas, como teor de ouro, pureza do ouro, preço de mercado do ouro e custo de compra das placas. Exploraram cenários pessimistas e otimistas, variando custos de investimento, quantidade de placas e taxa de desconto. Com um horizonte de planejamento de 15 anos, analisaram o processo hidrometalúrgico em oito cenários, destacando a importância da sustentabilidade e identificando limitações devido à falta de dados comprovados.

Outro estudo que abordou o tema foi conduzido por Peiró, Girón e Durany (2020), no qual realizaram uma pesquisa sobre a viabilidade econômica da desmontagem de unidades de disco rígido para extrair placas de circuito impresso e ímãs permanentes, usando operações não destrutivas em uma recicladora em Barcelona. A pesquisa incluiu a identificação de produtos relevantes, seleção de unidades de disco rígido, determinação das ferramentas e estimativa do tempo de desmontagem. A avaliação econômica considerou variáveis como tempo de desmontagem, horas de trabalho anuais e custo de

operadores especializados. Os resultados revelaram uma viabilidade econômica 2,5 vezes maior para as placas desmontadas em comparação com as trituradas.

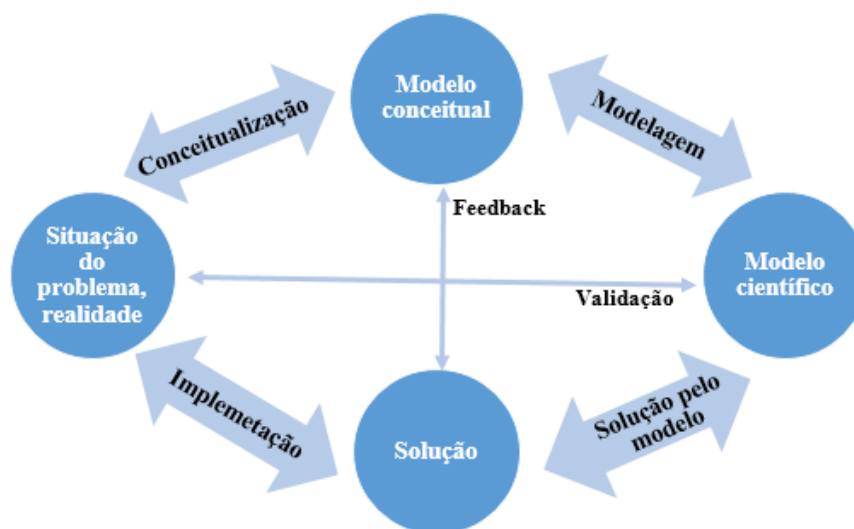
2.5 Modelagem e simulação

Segundo Pinto (2017), um sistema é definido como um conjunto de componentes ou entidades que interagem entre si com o propósito de alcançar um objetivo específico. Um sistema pode fazer parte de um universo complexo, exigindo uma investigação detalhada para obter informações relevantes. De acordo com Rodrigues, Nunes e Adriano (2010) um modelo é uma representação gráfica do sistema, ou seja, o modelo é a representação do sistema real. Portanto, quando a representação de um sistema, por meio de um modelo, é executada de maneira a transferir a realidade para um ambiente virtual, de forma que seja possível controlar as variáveis do processo, isso é definido como simulação computacional (Montevecchi *et al.*, 2010).

Um grande benefício da simulação computacional é possibilitar a análise antecipada dos resultados, com o objetivo de projetar comportamentos e avaliar estratégias (Pereira *et al.*, 2018; Gennaro *et al.*, 2017). Dessa forma, a simulação compreende bem mais do que desenvolver um modelo computacional, esta é apenas uma das diversas etapas do processo (Silva, 2006). De acordo com Felipe e Leismann (2019), as ferramentas de simulação são recursos que possibilitam a partir de métodos estatísticos, combinar as probabilidades de cenários esperados ocorrerem, de forma a mostrar o impacto positivo ou negativo nos resultados. Quando se aborda as aplicações do método de modelagem e simulação na literatura, observa-se que essa abordagem tem sido eficaz em estudos de LR de REEE como os estudos desenvolvidos por Amirdadi, Dehghanian e Kohneh (2022); Koshta, Patra e Singh (2021); Pourhejazy *et al.* (2020); Boundy (2020); Temur e Yanik (2017); Tadić *et al.* (2016), entre outros.

Para o desenvolvimento adequado de um modelo de simulação, é recomendável aplicar uma metodologia que proporcione uma sequência de passos a seguir. A primeira metodologia de simulação para a qual existem evidências é a proposta por Mitroff *et al.*, (1974). De acordo com Costa (2010), ao examinar diversos trabalhos publicados na literatura que abordam metodologias para guiar o desenvolvimento de simulações computacionais, nota-se que muitos desses métodos propostos estão alinhados com os conceitos e a estrutura recomendada no trabalho de Mitroff *et al.* (1974). Esta metodologia é dividida em quatro fases que são: conceitualização, modelagem, solução pelo modelo e implementação, conforme Figura 3.

Figura 3 - Ciclo de implementação do método de modelagem e simulação



Fonte: Adaptado de Mitroff *et al.* (1974)

Na fase inicial denominada conceitualização, é desenvolvido o modelo conceitual, construído com base na realidade, problema ou situação em estudo. Nessa etapa, são estabelecidas as variáveis que serão integradas ao modelo, ao mesmo tempo em que ocorre a delimitação do problema e do próprio modelo. Dessa forma é crucial compreender de maneira clara o sistema a ser simulado, estabelecendo os seus limites e objetivos. Na segunda etapa denominada “modelagem”, o modelo conceitual é transformado em um modelo computacional, no qual as relações causais entre as variáveis são definidas (Pereira; Montevechi; Miranda, 2013). É nesta etapa que ocorre o desenvolvimento da ideia de estruturação do modelo conceitual, para que seja um modelo analítico no qual possa ser representado por uma planilha eletrônica, uma linguagem de computação, ou um software de simulação (Martins *et al.*, 2012).

Na fase de modelagem é essencial realizar não apenas o desenvolvimento do modelo computacional, mas também a verificação e validação do mesmo. A verificação abrange aspectos "operacionais", visando confirmar a ausência de falhas no modelo. Por outro lado, a validação assegura, com uma determinada confiabilidade, que os resultados gerados pelo modelo simulado são consistentes com os resultados observados no sistema real (Pereira; Montevechi; Miranda, 2013).

Em seguida, na terceira fase, chamada de ‘solução pelo modelo’, são conduzidos os experimentos. A matemática desempenha um papel crucial, e o modelo científico é resolvido por meio de métodos matemáticos, permitindo aos analistas obter possíveis

soluções. Na última etapa, são aplicadas as soluções provenientes da simulação ao sistema real, após o qual um novo ciclo pode se iniciar (Mitroff *et al.*, 1974). É importante destacar que, se necessário, pode ocorrer uma realimentação do modelo conceitual, dando continuidade ao ciclo a partir desse modelo conceitual modificado (Pereira; Montevechi; Miranda, 2013).

A modelagem conceitual, de acordo com Sargent (2009), deve ser construída de maneira a facilitar a visualização e interpretação do sistema em estudo. Portanto, é possível utilizar esquemas, pseudocódigos e expressões verbais que representem a dinâmica do sistema, destacando suas funções e regras preestabelecidas. No entanto, a construção do modelo conceitual utilizando uma linguagem específica, como o uso de elementos disponíveis em determinado software de simulação, ou a adoção de um fluxograma esquemático, pode dificultar a compreensão do modelo por parte de pessoas que não estão familiarizadas com o software em questão. Além disso, no caso do fluxograma, a falta de recursos para descrever certos elementos característicos dos sistemas simulados pode prejudicar a interpretação da modelagem.

Nesse sentido, Leal (2008) propõem uma técnica de modelagem conceitual chamada IDEF-SIM (*Integrated Definitions Methods – Simulation*). Essa abordagem, ao fornecer elementos lógicos especificamente projetados para simulações, facilita a representação do sistema de maneira satisfatória e com leitura simplificada, ao mesmo tempo em que aprimora o processo de documentação (Leal, 2008). A técnica IDEF-SIM foi elaborada a partir das técnicas da família IDEF. Conforme o FIPS PUBS (1993), a família IDEF refere-se a um conjunto de técnicas processuais utilizadas para auxiliar nas melhorias e padronizar a integração das informações disponíveis em um sistema. Conforme Mayer, Painter e Witte (1992) os benefícios primordiais ao utilizar essa metodologia incluem a manutenção do foco nas decisões cruciais, controle e gestão das informações estratégicas, assim como a abrangência na descrição dos recursos necessários.

2.6 Simulação de Monte Carlo

A Simulação de Monte Carlo (SMC), abrange diversas abordagens destinadas para resolver problemas complexos por meio da utilização de números aleatórios, a partir da representação de um sistema real (Andersen; Panosetti; Reuter, 2019; Silva, 2017). Na SMC, são reproduzidos cenários e modelos de variáveis de entrada por meio de uma função densidade de probabilidade apropriada, que pode ser normal, triangular,

exponencial, uniforme, Poisson, entre outras (Ligo, 2003). Essa técnica é destinada para problemas, como por exemplo, os de especificidade econômica (Bernardi, 2002). Neste sentido pode-se destacar o estudo realizado por D'Adamo *et al.* (2019), no qual aplicam a SMC para avaliar a viabilidade econômica dos processos hidrometalúrgicos, empregados em pequenas e médias empresas.

A Análise de Sensibilidade presente na SMC consiste em examinar como a variação de um determinado dado de entrada pode influenciar nos resultados. Quando uma pequena alteração em um parâmetro causa um impacto significativo na rentabilidade de um projeto, diz-se que o projeto é altamente sensível a esse parâmetro. Nesse caso, é benéfico direcionar esforços para compreender e mitigar a incerteza associada a essa variável específica (Casarotto Filho; Kopittke, 2010). A Análise de Sensibilidade possibilita calcular o impacto da alteração de uma única variável por vez. No entanto, ao analisar um projeto com diferentes cenários, é viável considerar o efeito de um número limitado de combinações plausíveis. A SMC é uma ferramenta que permite explorar todas as opções possíveis levando em consideração suas probabilidades de ocorrência (Brealey; Myers; Allen, 2010).

Embora o VPL e a TIR sejam métodos clássicos para avaliação de qualquer investimento, eles têm natureza determinística, pois consideram fluxos de caixas fixos ao longo de um período de vida do projeto (Melo, 2012). Dessa forma torna-se necessário estimar as variações dos cenários devido à complexidade do ambiente econômico, e de sua instabilidade. A fim de obter resultados mais precisos e tomar decisões mais assertivas a presente pesquisa utilizará da SMC.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Definir o tipo de pesquisa no qual será realizada é de extrema importância, pois o pesquisador terá uma melhor orientação para definir quais os instrumentos e procedimentos metodológicos serão necessários, a fim de alcançar os objetivos da pesquisa.

3.1 Classificação do estudo

O presente estudo é classificado como natureza aplicada, pois conforme Kauark, Manhães e Medeiros (2010) a pesquisa aplicada tem o objetivo de gerar conhecimento a partir da solução de problemas específicos. Esta pesquisa é baseada no desenvolvimento de um modelo matemático empregando a SMC, para realizar a análise de um problema real e bem definido, que consiste em analisar a viabilidade econômica da LR de empresa que pretende atuar no setor de REEEs.

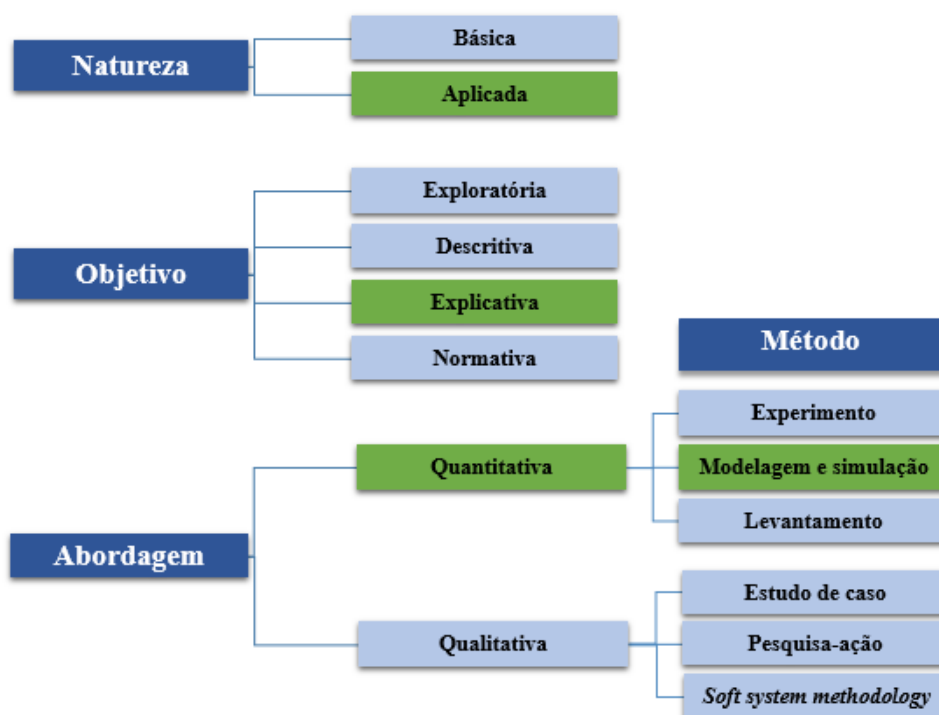
Já com relação aos objetivos a presente pesquisa é classificada com explicativa. De acordo com Gil (2008) o objetivo central das pesquisas explicativas é identificar os fatores que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. É o tipo de pesquisa que mais aprofunda o conhecimento da realidade. Para a realização do presente estudo será compreendido o processo de LR de REEEs, e com isso serão definidas as variáveis de entrada e saída que interferem neste processo.

Em seguida este estudo é classificado como abordagem quantitativa, segundo Martins *et al.* (2012) é nesta abordagem que o pesquisador é capaz de manipular as variáveis independentes, determinando níveis para elas, e verificar o resultado na variável dependente. Para a execução da presente pesquisa serão necessárias variáveis de entrada (independentes), contribuindo para os resultados das variáveis de saída, que são os indicadores de viabilidade econômica.

E por fim o método empregado neste estudo é o de modelagem e simulação, pois de acordo com Neto e Pureza (2012) esse método representa o sistema real por meio de modelos, imitando as operações ao longo do tempo. Com isso permite compreender melhor o ambiente em questão, elaborar estratégias, oportunidades, a fim de apoiar o processo de tomada de decisões. A escolha da ferramenta SMC foi devido a necessidade de incorporar as variações nos cenários (natureza estocástica), dada a complexidade e instabilidade do ambiente econômico. Embora o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) sejam métodos tradicionais para a avaliação de investimentos,

é essencial ressaltar sua natureza determinística, uma vez que consideram fluxos de caixa fixos ao longo do período de vida do projeto (Melo, 2012). A utilização combinada dos indicadores de viabilidade econômica, VPL e TIR, juntamente com a aplicação da SMC, proporciona resultados mais precisos e fundamenta decisões de maneira mais assertiva. A classificação completa desta pesquisa é visualizada na Figura 4, destacando-se em verde os quadros que representam a classificação.

Figura 4 - Classificação desta pesquisa



Fonte: Adaptado de Kauark, Manhães, Medeiros (2010)

3.2 Metodologia de simulação

As etapas deste estudo foram delineadas seguindo o modelo proposto por Mitroff *et al.* (1974). Conforme abordado na seção 2.5 desta dissertação, este modelo compreende quatro etapas distintas: conceitualização, modelagem, resolução pelo modelo e implementação. As seções subsequentes apresentam uma análise detalhada dos métodos empregados em cada uma dessas etapas.

Conforme Costa (2010), ao abordar metodologias orientadas ao desenvolvimento de simulações computacionais, é possível constatar que muitos dos métodos sugeridos estão alinhados com os conceitos e a estrutura recomendados no trabalho de Mitroff *et al.* (1974), indicando a relevância desta metodologia. O Quadro 4 fornece um resumo dos

materiais e métodos utilizados na aplicação da metodologia de Mitroff *et al.* (1974). As atividades listadas no quadro serão executadas de maneira sequencial, servindo como um guia para orientar o desenvolvimento desta pesquisa. O modelo proposto será exemplificado por meio de um estudo de caso, conforme será apresentado na seção 3.3 desta dissertação.

Quadro 4 - Materiais e métodos empregados na aplicação da metodologia de simulação

| Etapas da Metodologia | Atividades | Materiais e métodos |
|------------------------------|--|---|
| 1. Conceitualização | 1.1 Construção do modelo conceitual | Técnica IDEF-SIM <i>Software Draw.io</i> ®; Definição das variáveis de entrada e saída. |
| | 1.2 Validação do modelo conceitual | Projeto apresentado a um dos sócios da empresa estudada. |
| | 1.3 Modelagem dos dados de entrada | Coleta de dados; Definição das distribuições estatísticas. |
| 2. Modelagem | 2.1 Construção do modelo | Desenvolvimento do modelo matemático; Construção do Fluxo de Caixa Incremental (FCI) pelo <i>software Microsoft Excel</i> ®; Cálculo do VPL, TIR, WACC, CAPM, entre outros; Simulação de Monte Carlo pelo <i>Software Crystal Ball</i> ®; Cálculo da quantidade de emissão de CO ₂ durante o transporte. |
| | 2.2 Verificação do modelo computacional | Sistema simulado submetido a várias execuções e verificação das equações matemáticas. |
| 3. Solução pelo modelo | 3.1 Definição do projeto experimental | Definição dos cenários alternativos usando distribuições estatísticas. |
| | 3.2 Execução dos experimentos | Resultados da simulação seção 5 desta dissertação; Análise dos resultados na seção 6 desta dissertação. |
| 4. Implementação | 4.1 Aplicação das soluções provenientes da simulação ao sistema real | As soluções serão apresentadas à empresa. |

3.2.1 Fase de conceitualização

Na fase de conceitualização, a proposta desta dissertação é utilizar a técnica IDEF-SIM, conforme apresentado na seção 2.5 deste estudo. Embora seja uma técnica com maior utilização na SED, destaca-se pela capacidade de criar modelos de fácil interpretação, evidenciando os elementos funcionais de um sistema. Esses modelos elucidam a interação entre as atividades de um processo e seus componentes, proporcionando um suporte valioso para um projeto de simulação, independentemente do tipo de simulação a ser realizada (Oliveira, 2010).

Para a implementação prática do IDEF-SIM, optou-se pelo uso do *software online Draw.io*®. Esta ferramenta é gratuita e autônoma, acessível a partir de um *site*, o que

torna sua utilização extremamente prática (Feu, 2015). Ainda na fase de conceitualização, serão definidas as variáveis, para a elaboração do modelo.

3.2.2 Fase de modelagem

Na fase de modelagem, a criação do Fluxo de Caixa Incremental (FCI) será conduzida no ambiente do *Microsoft Excel*®. A ferramenta escolhida para a execução da Simulação de Monte Carlo foi o *Crystal Ball*®, um suplemento do *Microsoft Excel*® distribuído pela *Oracle*®. O *software Crystal Ball*® é fundamentado no método de SMC e destaca-se por sua interface de fácil manuseio, eliminando a necessidade de aprender uma linguagem especial ou lidar com um *layout* complexo. Vale ressaltar que o *Crystal Ball* é amplamente adotado, sendo utilizado por aproximadamente 85% das empresas listadas na *Fortune 500* (Sa, 2017). Essa ampla adoção destaca a confiabilidade e a eficácia dessa ferramenta em ambientes empresariais.

A proposta é empregar o VPL e a TIR como os indicadores de viabilidade econômica do FC. O VPL será calculado conforme a Equação 2, apresentada na seção 2.4 desta pesquisa. Segundo Zanin e Bagatini (2012), o VPL é um método amplamente utilizado na análise de investimentos em projetos, sendo preferido por profissionais de finanças devido à sua facilidade de interpretação dos resultados. Além disso, será empregada a TIR, utilizando a Equação 3, também presente na seção 2.4 desta dissertação. De acordo com Boundy (2020), a TIR é frequentemente empregada para avaliar a atratividade de um investimento por parte dos investidores.

A TMA será determinada a partir do cálculo do WACC, conforme a Equação 4 apresentada na seção 2.4 deste estudo. O WACC, por sua vez, requer a obtenção do custo de capital de terceiros, calculado conforme a Equação 7, descrita na seção 2.4 deste trabalho, bem como do custo de capital próprio. Para o cálculo do custo de capital próprio, será utilizado o modelo CAPM, calculado pela Equação 5, presente nesta dissertação. De acordo com Welch (2008), o CAPM é um modelo amplamente aplicado para estimar o custo do capital próprio, sendo recomendado por diversos professores de finanças. No método do CAPM, é essencial calcular o beta de ativos, o qual é determinado pela Equação 6, apresentada na seção 2.4 deste estudo.

Como se trata de uma simulação de viabilidade econômica, para a verificação do modelo desenvolvido, todas as equações matemáticas serão minuciosamente revisadas.

Além disso, o sistema simulado será submetido a múltiplas execuções, com o intuito de assegurar a inexistência de erros lógicos na simulação.

3.2.3 Fase de solução pelo modelo

Na fase de solução pelo modelo, após a verificação do modelo computacional o mesmo estará pronto para ser ajustado conforme as alterações nos parâmetros. Nesta etapa, serão estabelecidos cenários alternativos, levando em consideração a relevância de cada cenário para a LR de REEE. Isso será feito especificando as distribuições de probabilidade associadas às algumas variáveis de entrada. As experimentações, envolvendo a variação de parâmetros, serão conduzidas no ambiente do *Crystal Ball*®.

Vale destacar que, inicialmente, será conduzida uma análise determinística dos valores dos resíduos coletados até o momento pela Empresa Alfa, para as situações RInt e RDesmont, com o intuito de avaliar a viabilidade econômica atual. Será efetuada outra análise determinística, a fim de calcular a quantidade necessária de REEE a ser coletada para atingir um VPL igual a zero em ambas as situações. Posteriormente, análises estocásticas serão executadas para identificar as quantidades ideais de REEE a serem coletadas para cada cenário, levando em consideração a análise de risco, a fim de manter a probabilidade do VPL ser negativo o mais próximo possível de zero. Serão efetuadas também análises de sensibilidade, para identificar as variáveis que mais impactam o valor do VPL. Ambos os processos, análise de risco e de sensibilidade, serão realizados utilizando o software *Crystal Ball*®.

Com o intuito de aprimorar a viabilidade econômica da situação RDesmont, a qual engloba diversas etapas de reciclagem, foram realizadas simulações para todos os cenários, implementando uma redução de 50% no tempo necessário para desmontagem e trituração. A situação RDesmont com essa redução será referida como RDesmont50DT. Além disso, outra situação foi proposta, incorporando uma redução de 75% nos tributos aplicados, sendo denominada como RDesmont75T.

Vale destacar também, que será calculada a quantidade em quilogramas de dióxido de carbono (CO₂) emitido durante o transporte para coleta e venda. Para isso, será utilizado a Equação 1 apresentada na seção 2.3 deste estudo. Será calculada também a quantidade de mão de obra necessária para implementar as situações em estudo, para isso serão utilizadas as Equações 9 e 10.

3.2.4 Fase de implementação

Na fase final, denominada implementação, os resultados derivados da simulação serão apresentados a um dos sócios da empresa selecionada.

3.3 Caracterização do local de estudo

O modelo proposto será ilustrado por meio de uma empresa localizada no sul de Minas Gerais, com mais de 15 anos de atuação no segmento de LR de resíduos de serviços de saúde e resíduos industriais, abrangendo os estados de São Paulo e Minas Gerais. A empresa desempenha um papel abrangente, sendo responsável pela coleta, transporte, armazenamento temporário, triagem, transbordo, tratamento por esterilização ou incineração, bem como pela destinação ambientalmente adequada dos resíduos.

No escopo de suas operações, a empresa em questão emite manifestos de transporte de resíduos junto aos órgãos ambientais e também emite certificados de destinação final dos resíduos. Os resíduos de serviços de saúde são coletados de diversos estabelecimentos, como consultórios odontológicos e médicos, hospitais, postos de saúde, entre outros. Já os resíduos industriais originam-se de atividades de diferentes setores, incluindo químico, petroquímico, metalúrgico, alimentício, papel e celulose, entre outros.

A empresa em estudo possui a natureza jurídica de Sociedade Empresária Limitada (Ltda), indicando que é uma entidade de caráter privado, com responsabilidade dos sócios limitada ao valor de suas quotas (Melo, 2014). Além disso, a empresa está enquadrada no regime tributário de lucro real. O lucro real é um modelo de regime tributário em que o imposto de renda é calculado com base nos resultados contábeis da empresa, considerando os lucros efetivos obtidos durante determinado período (BRASIL, 1999). Por questões de confidencialidade, a empresa em questão será designada como "Empresa Alfa".

4 DESENVOLVIMENTO DA MODELAGEM E SIMULAÇÃO

Neste capítulo serão realizadas as atividades necessárias para a construção da modelagem e simulação, empregando a estrutura proposta por Mitroff *et al.* (1974).

4.1 Fase de conceitualização

O propósito deste modelo matemático no qual emprega a SMC, é avaliar a viabilidade econômica da LR aplicada aos REEEs, em duas situações. A primeira situação envolve apenas a coleta e venda das peças inteiras dos REEEs, referida como RInt; enquanto a segunda inclui a coleta, pré-tratamento, trituração e venda, designada como RDesmont. Como indicado na seção 3.3, o modelo proposto será aplicado por meio da Empresa Alfa, comparando RInt e RDesmont. Os componentes considerados são:

- Plásticos triturado;
- Metais não preciosos, como ferro (Fe) e/ou alumínio (Al);
- Componentes nobres, que englobam elementos ricos em metais preciosos, como placas de circuito impresso (PCI), memória, processador de computador, disco rígido externo e cooler.

Inicialmente, os modelos conceituais para ambos os casos foram desenvolvidos utilizando a técnica IDEF-SIM, como descrito na seção 3.2 deste estudo. No RInt, o processo começa com a coleta dos REEEs. A Empresa Alfa transporta esses REEEs por meio de um caminhão até suas instalações, onde são armazenados no estoque. Quando surge uma oportunidade de venda, os REEEs são comercializados e enviados pela Empresa Alfa ao comprador. Após a chegada ao comprador, os REEEs são descarregados, finalizando o processo, conforme representado na Figura 5.

No RDesmont, o processo começa de forma semelhante ao primeiro modelo, com a coleta dos REEEs. Em seguida, a Empresa Alfa transporta esses REEEs por meio de um caminhão até suas instalações, onde são armazenados no estoque. Posteriormente, os REEEs passam por um processo de desmontagem realizado manualmente por operadores, cujo número de trabalhadores varia de acordo com a quantidade de REEEs coletada. A desmontagem resulta em diversos materiais, como plásticos, metal, componentes nobres e rejeitos. Esses materiais, após a separação, são direcionados para seus respectivos estoques, aguardando oportunidades de venda. Exceto pelos plásticos que são submetidos ao processo de trituração, e os rejeitos que são temporariamente armazenados no estoque antes de serem encaminhados para o aterro.

Quando os plásticos, metais e componentes nobres são vendidos, a Empresa Alfa os envia ao comprador. Ao chegarem no comprador, os materiais são descarregados, concluindo assim o processo, conforme ilustrado na Figura 6. Para validar o modelo conceitual, o projeto foi apresentado a um dos sócios da Empresa Alfa, que examinou e validou o modelo, garantindo a consistência e a representação adequada do sistema em relação à realidade observada.

Figura 5 - Modelo conceitual do RInt

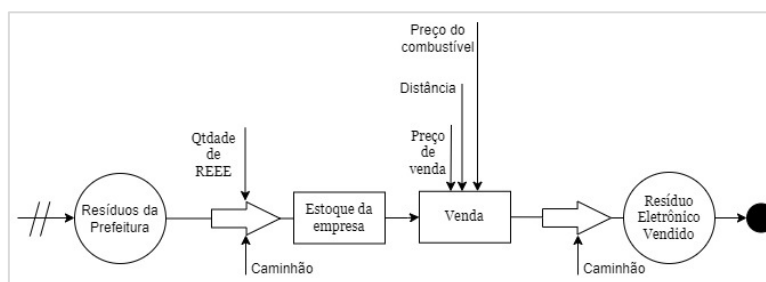
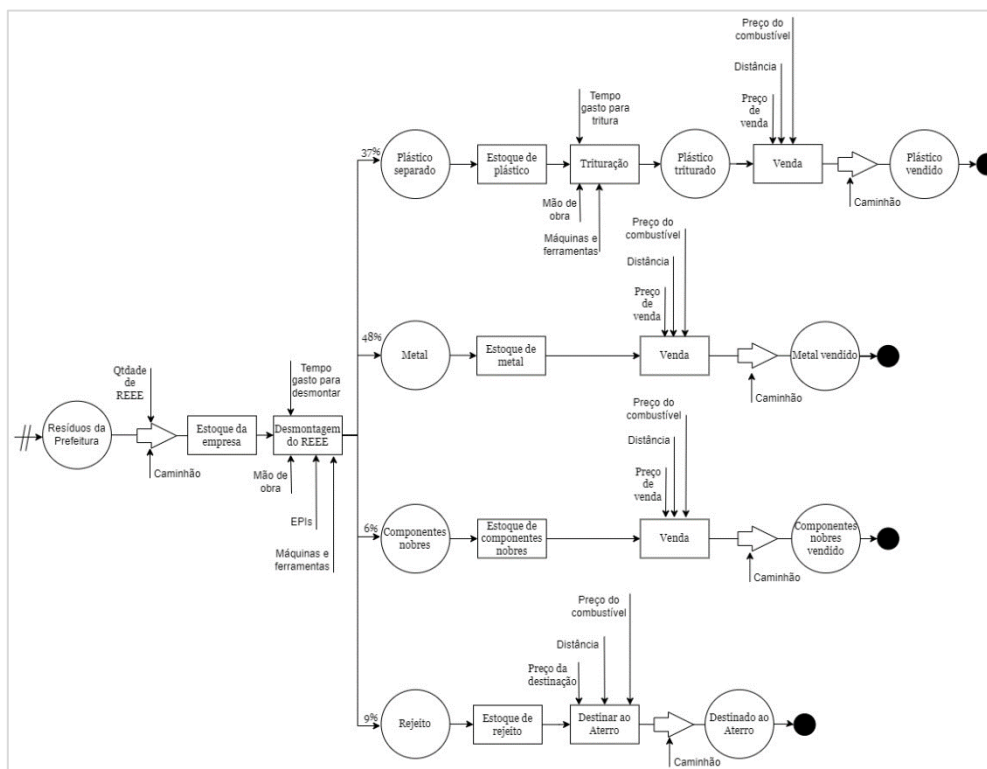


Figura 6 - Modelo conceitual do RDesmont



A partir do modelo conceitual e das pesquisas desenvolvidas por Sun *et al.* (2023), Agrawal *et al.* (2023), Mairizal *et al.* (2023), Reinhart *et al.* (2023), D'adamo *et al.* (2023), Boundy (2020), foi possível identificar as variáveis necessárias para a elaboração

do modelo matemático, Equação 20. As variáveis de entrada são essenciais para incorporar todos os fatores que influenciam o resultado, com o objetivo de representar de maneira abrangente o problema real. Por outro lado, as variáveis de saída são projetadas para reproduzir o desempenho do sistema real, proporcionando uma visão precisa e representativa do comportamento do modelo em relação às condições específicas do ambiente em estudo. Dessa forma, o modelo matemático deste estudo contempla 47 diferentes variáveis de entrada. Segue na sequência as variáveis e suas respectivas representações:

1. A_W – Capacidade total, do veículo ‘W’, neste estudo é o caminhão;
2. B_W – Consumo de combustível, do veículo ‘W’, neste estudo é o caminhão;
3. $d_{CN,i}$ – Distância percorrida, no trajeto de venda do componente nobre ‘CN’, deslocamento de ida e volta, durante o ano ‘i’;
4. $d_{Int,i}$ – Distância percorrida, no trajeto de venda da peça inteira ‘Int’, deslocamento de ida e volta, durante o ano ‘i’;
5. $d_{M,i}$ – Distância percorrida, no trajeto de venda do metal ‘M’, deslocamento de ida e volta, durante o ano ‘i’;
6. $d_{P,i}$ – Distância percorrida, no trajeto de venda do plástico triturado ‘P’, deslocamento de ida e volta, durante o ano ‘i’;
7. $d_{R,i}$ – Distância percorrida, no trajeto de encaminhamento do rejeito ao aterro ‘R’, deslocamento de ida e volta, durante o ano ‘i’;
8. $d_{coleta,i}$ – Distância percorrida, no trajeto de coleta ‘coleta’, deslocamento de ida e volta, durante o ano ‘i’;
9. $G_{A,i}$ – Despesa, com o aluguel do empreendimento ‘A’, durante o ano ‘i’;
10. $G_{E,i}$ – Despesa, com a energia elétrica ‘E’, durante o ano ‘i’;
11. $G_{F,i}$ – Despesa, financeira (Juros) ‘F’, durante o ano ‘i’;
12. $G_{L,i}$ – Despesa, com a limpeza ‘L’, durante o ano ‘i’;
13. $G_{MOE,i}$ – Despesa, com a mão de obra para o escritório ‘MOE’, durante o ano ‘i’;
14. $G_{TI,i}$ – Despesa, com o telefone e a internet ‘TI’, durante o ano ‘i’;
15. $G_{U,i}$ – Despesa, com a água ‘U’, durante o ano ‘i’;
16. $K_{K,i}$ – Custo, com a mão de obra do processo ‘K’, neste estudo é a desmontagem e trituração, durante o ano ‘i’;

17. $P_{CN,i}$ – Preço, de venda do componente nobre ‘CN’, durante o ano ‘i’;
18. $P_{Comb,i}$ – Preço, do combustível ‘Comb’, durante o ano ‘i’;
19. $P_{EPI,i}$ – Preço, do Equipamentos de Proteção Individual (EPI) do tipo ‘EPI’, durante o ano ‘i’;
20. $P_{Int,i}$ – Preço, de venda da peça inteira ‘Int’, durante o ano ‘i’;
21. $P_{M,i}$ – Preço, de venda do metal ‘M’, durante o ano ‘i’;
22. $P_{Man,W,i}$ – Preço, da manutenção ‘Man’, do veículo ‘W’, durante o ano ‘i’;
23. $P_{Maq,i}$ – Preço, do maquinário e ferramenta do tipo ‘Maq’, durante o ano ‘i’;
24. $P_{P,i}$ – Preço, de venda do plástico triturado ‘P’, durante o ano ‘i’;
25. $P_{R,i}$ – Preço, para o encaminhamento do rejeito ao aterro ‘R’, durante o ano ‘i’;
26. P_W – Preço, do veículo ‘W’;
27. Q_{EPI} – Quantidade, de EPI por mão de obra, do tipo ‘EPI’;
28. Q_K – Quantidade, de mão de obra do processo ‘K’, neste estudo é a desmontagem e trituração;
29. Q_{MOE} – Quantidade, de mão de obra de escritório ‘MOE’;
30. Q_{Maq} – Quantidade, de maquinário ou ferramenta por mão de obra, do tipo ‘Maq’;
31. $Q_{residuo}$ - Quantidade, de REEE coletado ‘residuo’;
32. S_{CN} – Percentual, do componente nobre ‘CN’ no REEE;
33. $S_{Dep,Maq,i}$ – Percentual, de depreciação ‘Dep’, do maquinário e ferramenta do tipo ‘Maq’, durante o ano ‘i’;
34. S_M – Percentual, do metal ‘M’ no REEE;
35. S_P – Percentual, do plástico ‘P’ no REEE;
36. S_R – Percentual, do rejeito ‘R’ no REEE;
37. $S_{trb,S}$ – Percentual, do tributo sobre receita bruta do tipo ‘trb’, do local no qual o tributo incide ‘S’;
38. $S_{tl,S}$ – Percentual, do tributo sobre lucro do tipo ‘tl’, do local no qual o tributo incide ‘S’;
39. U_{Desm} – Tempo, para a desmontagem ‘Desm’;
40. U_{HP} – Tempo, do horizonte de planejamento do Fluxo de Caixa;
41. U_{Tri} – Tempo, para a trituração ‘Tri’;

42. $V_{Amort,i}$ – Valor, da amortização ‘Amort’, durante o ano ‘i’;
43. $V_{CapG,i}$ – Valor, do capital de giro ‘CapG’;
44. $V_{Finan,i}$ – Valor, do financiamento liberado do tipo ‘Finan’, durante o ano ‘i’;
45. $V_{Invest,i}$ – Valor, do investimento ‘Invest’;
46. V_{ResVA} – Valor, do resultado da venda do ativo ‘ResVA’;
47. V_{TMA} – Valor, da Taxa Mínima de Atratividade ‘TMA’.

Em relação aos dados das variáveis $P_{Int,i}$; $P_{P,i}$; $P_{M,i}$; $P_{CN,i}$; $P_{R,i}$; $P_{Man,W,i}$; $Q_{residuo}$; A_w ; B_w ; S_{IRPJ} ; S_{CSLL} ; S_{IPI} ; $S_{ICMS,MG}$ e $S_{ICMS,SP}$ foram obtidos a partir da Empresa Alfa. A limitação identificada neste estudo refere-se a variável $P_{CN,i}$, para a qual foi considerada a média de venda deste material. No entanto, os componentes nobres abrangem uma variedade de tipos, como processadores cerâmicos, processadores plásticos, memórias, placas de telefonia com e sem ponteira, placa mãe verdes ou coloridas, entre outros, cujos preços oscilam.

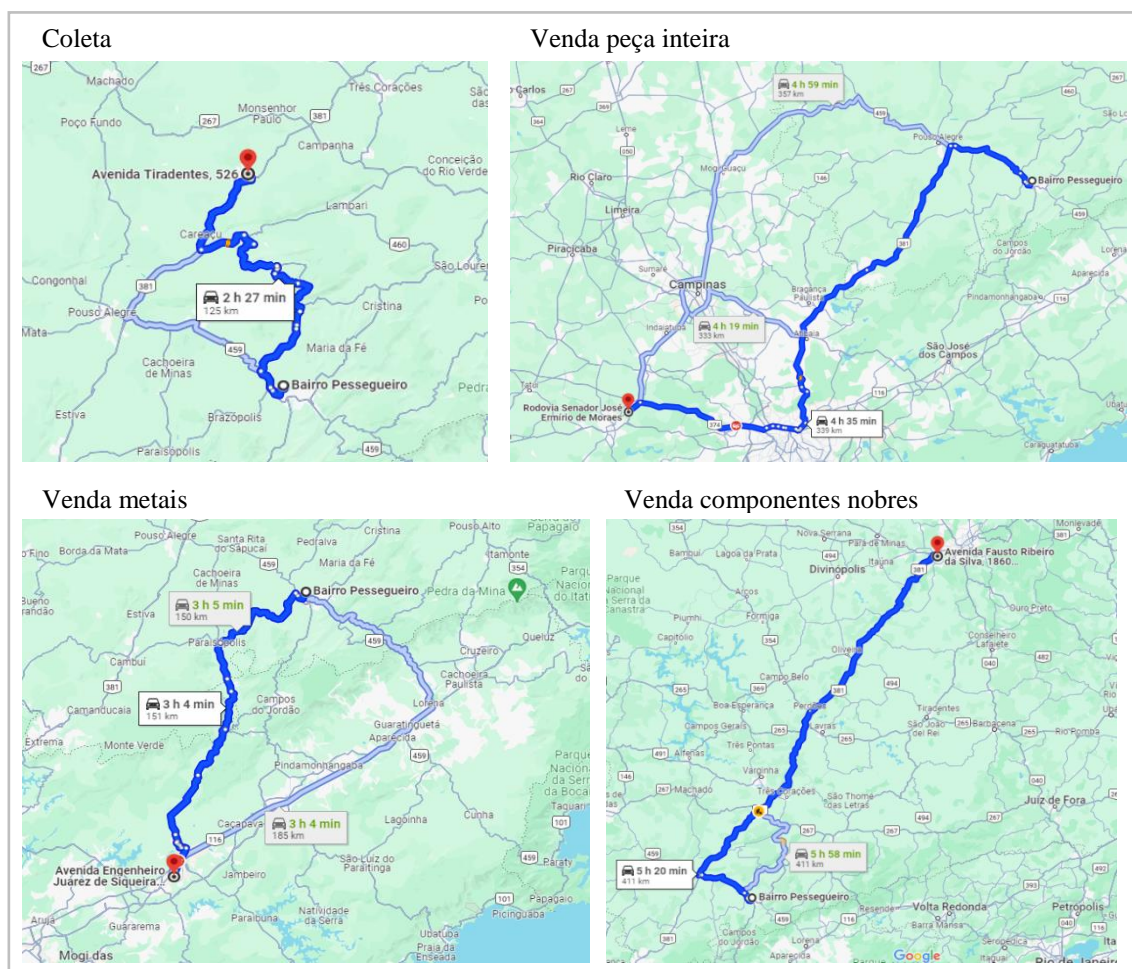
Já os dados das variáveis S_P ; S_M ; S_{CN} e S_R foram extraídos do estudo de Rocha e Penteadó (2021), uma vez que são os mesmos materiais analisados na presente pesquisa. Esses materiais incluem (3) equipamentos de tecnologia da informação, como computadores, notebooks, telefones, celulares e (4) equipamentos de informação, som e imagem, como aparelhos de rádio, câmeras de vídeo, gravadores de vídeo, conforme classificação abordada na seção 2.2 desta dissertação.

Para o dado da variável $P_{Comb,i}$ foram utilizadas as informações fornecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (2023), referentes aos preços do diesel do dia 03/10/2023 ao dia 02/01/2024. Os dados das variáveis $P_{Maq,i}$ e $P_{EPI,i}$ de cada item, foram obtidos a partir de orçamentos em lojas específicas, e ao final foi feita uma média destes valores. Para a definição destes maquinários e ferramentas foi utilizado o estudo efetuado por Xavier *et al.* (2020). O valor da variável $S_{Dep,Maq,i}$ de cada item, foi retirado da Instrução Normativa RFB nº 1700, de 14/03/2017, da Secretaria da Receita Federal do Brasil (BRASIL, 2017).

O valor da variável V_{Invest} foi obtido somando os valores da variável $P_{Maq,i}$ de cada item. O valor referente a variável U_{Desm} foi obtido mediante média dos tempos de desmontagem, disponibilizados no site da Rede Latino-Americana Europeia de Pesquisa, Desenvolvimento Análise de Resíduos Eletroeletrônicos – LaWEEEda (2019). Já o valor

relativo a variável U_{Tri} foi extraído do estudo conduzido por Pereira e Oliveira (2016). Os dados de entrada das $d_{coleta,i}$; $d_{Int,i}$; $d_{P,i}$; $d_{M,i}$; $d_{CN,i}$ e $d_{R,i}$ foram calculados a partir das informações fornecidas pela Empresa Alfa, como o nome e o endereço dos possíveis compradores. Com essas informações, foi possível obter as distâncias entre os locais por meio do *Google Maps*®, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Distância percorrida para coleta e venda dos REEEs



Fonte: *Google Maps* (2023)

Em relação aos dados de entrada das variáveis S_{PIS} e S_{Cofins} destaca-se que a Lei nº 11.196/2005, no artigo 48, prevê a suspensão da cobrança dessas contribuições para o PIS/Pasep e para a Cofins na venda de desperdícios, resíduos ou aparas, especificamente para pessoa jurídica que apure o imposto de renda com base no lucro real (BRASIL, 2005). Portanto, as variáveis S_{PIS} e S_{Cofins} não serão aplicadas. Essa suspensão busca fomentar empreendimentos de reciclagem, representando uma iniciativa para compensar a produção e comercialização de materiais recicláveis com baixo valor agregado. Essa

medida permite que a empresa alcance ganhos financeiros, adquira equipamentos e aumente a produtividade. Já o dado da variável $K_{K,i}$ foi calculado conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Custo com uma mão de obra no processo de desmontagem e trituração

| Item | Quantidade de meses | Percentual | Valor |
|-------------------------------|---------------------|------------|---------------|
| Salário | - | - | R\$ 1.600,00 |
| Férias | - | - | R\$ 133,33 |
| 1/3 das férias | - | - | R\$ 44,44 |
| 13º salário | - | - | R\$ 133,33 |
| FGTS mensal | - | 8,00% | R\$ 128,00 |
| FGTS anual sobre férias e 13º | - | 8,00% | R\$ 24,89 |
| INSS | - | 27,80% | R\$ 444,80 |
| INSS anual sobre férias e 13º | - | 27,80% | R\$ 86,49 |
| Total por mês | - | - | R\$ 2.595,29 |
| Total por ano | 12 | - | R\$ 31.143,47 |

Para o valor associado à variável U_{HP} este modelo propõe um período de 10 anos, seguindo a abordagem de Boundy (2020) e D'adamo *et al.* (2019). Vale ressaltar que, a aplicação do modelo ocorrerá em uma empresa já em operação com outros resíduos, e sem a necessidade de recorrer a financiamentos, dessa forma os valores das variáveis Q_{MOE} ; $G_{MOE,i}$; $G_{E,i}$; $G_{U,i}$; $G_{L,i}$; $G_{TI,i}$; $G_{F,i}$; $V_{Amort,i}$; $V_{Finan,i}$; P_W serão considerados nulos. Quanto à variável Q_K sua determinação será realizada por meio da aplicação da Equação 9.

$$Q_K = \frac{(U_{Desm} + U_{Tri})}{TT} \quad (9)$$

Para aplicar a Equação 9 é necessário calcular o *Takt Time* (TT) Equação 8 da seção 2.4 deste estudo. Devido à abrangência, será apresentada uma equação mais específica para a LR de REEE, Equação 10.

$$TT = \frac{\text{Tempo de produção disponível no período } p}{\text{Número de produtos pedidos no período } p} = \frac{U_{Tmes}}{\left[\frac{\left(\frac{Q_{residuo}}{M_{Medio}} \right)}{12} \right]} \quad (10)$$

Em que:

- U_{Tmes} – Tempo total de trabalho mensal ‘Tmes’ em minutos;
- M_{Medio} – Peso médio do EEE estudado.

O valor de U_{Tmes} foi estabelecido como 8 horas por dia. Quanto a obtenção do valor da variável M_{medio} baseou-se na média dos resultados dos estudos de Panchal, Singh e Diwan (2021); Hischer e Boni (2021). Já as variáveis Q_{Maq} e Q_{EPI} dependerão da variável Q_K . A Tabela 2 apresenta todos os valores das variáveis de entrada.

Tabela 2 - Valores das variáveis de entrada

| Variáveis | Dados | Unidade | Observação | Instrução Normativa RFB n° 1700 |
|-------------------------------|---------------|-----------|-----------------------|---------------------------------|
| A_W | 3,5 | ton. | - | - |
| B_W | 6 | km/litro | - | - |
| $d_{coleta,i}$ | 250 | km | - | - |
| $d_{Int,i}$ | 678 | km | - | - |
| $d_{P,i}$ | 678 | km | - | - |
| $d_{M,i}$ | 302 | km | - | - |
| $d_{CN,i}$ | 822 | km | - | - |
| $d_{R,i}$ | 140 | km | - | - |
| $K_{K,i}$ | R\$ 31.143,47 | R\$/ano | Valor por trabalhador | - |
| $P_{Int,i}$ | 2,91 | R\$/kg | - | - |
| $P_{P,i}$ | 5,40 | R\$/kg | - | - |
| $P_{M,i}$ | 3,50 | R\$/kg | - | - |
| $P_{CN,i}$ | 45,00 | R\$/kg | - | - |
| $P_{R,i}$ | 150,00 | R\$/ton. | - | - |
| $P_{Comb,i}$ | 6,29 | R\$/l | - | - |
| $P_{Man,W,i}$ | 14.000,00 | R\$/unid. | - | - |
| $P_{bancada,i}$ | 1.409,55 | R\$/uni. | - | - |
| $P_{Jogo\ chave\ fenda,i}$ | 169,06 | R\$/uni. | - | - |
| $P_{kit\ alicata,i}$ | 111,25 | R\$/unid. | - | - |
| $P_{estilete,i}$ | 64,45 | R\$/unid. | - | - |
| $P_{balança\ de\ 1000\ kg,i}$ | 3.026,05 | R\$/unid. | - | - |
| $P_{triturador,i}$ | 7.559,10 | R\$/unid. | - | - |
| $P_{folha\ de\ EVA,i}$ | 1.078,02 | R\$ | Troca anual | - |
| $P_{óculos\ de\ proteção,i}$ | 4,98 | R\$/unid. | Troca anual | - |
| $P_{luva\ de\ segurança,i}$ | 11,90 | R\$/unid. | Troca anual | - |
| $P_{calça,i}$ | 85,60 | R\$/unid. | Troca anual | - |
| $P_{blusa,i}$ | 72,30 | R\$/unid. | Troca anual | - |
| $P_{máscara\ de\ proteção,i}$ | 148,99 | R\$/unid. | Troca anual | - |

| Variáveis | Dados | Unidade | Observação | Instrução Normativa RFB nº 1700 |
|------------------------------------|----------------|------------------|----------------------|---------------------------------|
| $P_{sapato,i}$ | 85,23 | R\$/unid. | Troca a cada 2 anos | - |
| $Q_{residuo}$ | 3.529,00 | kg/ano | - | - |
| $Q_{bancada}$ | 1 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{jogo\ chave\ de\ fenda}$ | 1 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{kit\ alicate}$ | 1 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{estilete}$ | 1 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{balança\ de\ 1000\ kg}$ | 1 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{triturador}$ | 1 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{folha\ de\ EVA}$ | 1 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{óculos\ de\ proteção}$ | 2 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{luva\ de\ segurança}$ | 2 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{calça}$ | 2 | Unidade/Operador | - | - |
| Q_{blusa} | 2 | Unidade/Operador | - | - |
| $Q_{máscara\ de\ proteção}$ | 2 | Unidade/Operador | - | - |
| Q_{sapato} | 2 | Unidade/Operador | - | - |
| S_P | 37 | % | - | - |
| S_M | 48 | % | - | - |
| S_{CN} | 6 | % | - | - |
| S_R | 9 | % | - | - |
| $S_{Dep,bancada,i}$ | 10 | % | - | 9403 |
| $S_{Dep,jogo\ chave\ de\ fenda,i}$ | 20 | % | - | 8204 |
| $S_{Dep,kit\ alicate,i}$ | 20 | % | - | 8203 |
| $S_{Dep,estilete,i}$ | 20 | % | - | 8203 |
| $S_{Dep,balança\ de\ 1000\ kg,i}$ | 10 | % | - | 8423 |
| $S_{Dep,triturador,i}$ | 10 | % | - | 8479.82 |
| $S_{ICMS,MG}$ | 0 | % | - | - |
| $S_{ICMS,SP}$ | 12 | % | - | - |
| $S_{IPI,MG}$ | 0 | % | - | - |
| $S_{IPI,SP}$ | 0 | % | - | - |
| S_{PIS} | 0 | % | - | - |
| S_{Cofins} | 0 | % | - | - |
| S_{IRPJ} | 25 | % | - | - |
| S_{CSLL} | 9 | % | - | - |
| U_{Desm} | 16 | min. | - | - |
| U_{Tri} | 4 | min. | - | - |
| V_{capG} | 1/3 dos custos | R\$ | - | - |
| V_{Invest} | 12.339,47 | R\$ | - | - |
| V_{ResVA} | 30 | % | Sobre o investimento | - |

| | | | | |
|-------------|------|------|---|---|
| U_{HP} | 10 | Anos | - | - |
| M_{medio} | 1,87 | kg | - | - |

No cenário inicial, as variáveis a serem osciladas na situação RInt são $P_{Int,i}$ e $d_{Int,i}$. Na situação RDesmont, por sua vez, as variáveis a serem osciladas são $P_{P,i}$, $P_{M,i}$, $P_{CN,i}$, $P_{R,i}$, $d_{P,i}$, $d_{M,i}$, $d_{CN,i}$, $d_{R,i}$. Considerando que a aplicação do modelo ocorrerá em uma empresa que não possui histórico disponível, foi necessário realizar estimativas das oscilações das variáveis para representar a instabilidade inerente aos dados. A variável $P_{Comb,i}$ é uma exceção, pois foram utilizadas as informações fornecidas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2023), a partir desses dados, foi possível obter a distribuição denominada logística para esta variável, e a determinação da distribuição foi realizada por meio do *software Crystal Ball®*. Para as demais variáveis, foi empregada a distribuição triangular, onde o valor mais provável oscilou em 10% para menos para definir os valores mínimos e em 10% para mais para estabelecer os valores máximos. Conforme evidenciado na Tabela 3, para ambas as situações sendo elas RInt e RDesmont.

Tabela 3 - Oscilação das variáveis no Cenário Inicial dos Modelos 1 e 2

| Cenário Inicial – RInt | | | |
|-----------------------------------|---------------|----------------------|---------------|
| Variável | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_{Int} | - 10% | R\$ 2,91 | + 10% |
| d_{Int} | - 10% | 678,00 | + 10% |
| Cenário Inicial – RDesmont | | | |
| Variável | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_P | - 10% | R\$ 5,40 | + 10% |
| P_M | - 10% | R\$ 3,50 | + 10% |
| P_{CN} | - 10% | R\$ 35,00 | + 10% |
| P_R | - 10% | R\$ 150,00 | + 10% |
| d_P | - 10% | 678,00 | + 10% |
| d_M | - 10% | 302,00 | + 10% |
| d_{CN} | - 10% | 822,00 | + 10% |
| d_R | - 10% | 140,00 | + 10% |

Em contextos com dados limitados, recomenda-se a adoção da distribuição triangular devido à sua simplicidade e à clareza em sua função de densidade de probabilidade. Esta distribuição é considerada uma aproximação eficaz, requerendo

poucos parâmetros em sua definição (Peternelli; Silva; Leite, 2006; Assis *et al.*, 2006; Leuangthong; Khan; Deutsch, 2008). Conforme apontam esses estudos, tais características fazem da distribuição triangular uma escolha frequentemente adotada. Assim, a distribuição de probabilidade para o cenário inicial foi definida para as situações RInt e RDesmont, conforme detalhado nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

Tabela 4 - Distribuições estatísticas do RInt no cenário inicial

| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
|------------|----------------------|----------|---------------|----------|----------|----------|
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{Int} | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |

Tabela 5 - Distribuições estatísticas do RDesmont no cenário inicial

| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
|------------|----------------------|------------|---------------|------------|----------|----------|
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| d_M | Triangular | 271,80 | 302,00 | 332,20 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 739,80 | 822,00 | 904,20 | - | - |
| d_R | Triangular | 126,00 | 140,00 | 154,00 | - | - |

4.2 Fase de modelagem

A criação do modelo proposto foi realizada utilizando o *software Microsoft Excel*® e o *Crystal Ball*®, conforme mencionado na seção 3.2.2. Inicialmente, procedeu-se à construção do DRE e do FCI para ambas as situações, RInt e RDesmont. Essa elaboração envolveu a construção das seguintes Equações: receita bruta (RB_i) Equação 11, receita líquida (RL_i) Equação 12, lucro bruto (LB_i) Equação 13, depreciação (J_i) Equação 14, lucro antes de juros e imposto de renda ($LAJIR_i$) Equação 15, lucro antes dos tributos ($LAIR_i$) Equação 16, lucro líquido (LL_i), Equação 17, depreciação acumulada (J_{Acum}) Equação 18 e valor residual (VR_i) Equação 19, sendo i o ano até atingir o valor

do U_{HP} , para todas as equações aqui abordadas. Para que assim fosse possível obter o modelo matemático proposto pelo presente estudo, o Fluxo de Caixa (FC_i), Equação 20.

$$RB_i = Q_{residuo} * P_{Int} + Q_{residuo} * S_P * P_P + Q_{residuo} * S_M * P_M + Q_{residuo} * S_{CN} * P_{CN} \quad (11)$$

$$RL_i = RB_i - (RB_i * S_{lr,b,S}) \quad (12)$$

$$LB_i = RL_i - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{Q_{residuo}}{A_W} \right) * d_{coleta,i} \right]}{B_W} \right\} * P_{Comb,i} - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{Q_{residuo}}{A_W} \right) * d_{Int,i} \right]}{B_W} \right\} * P_{Comb,i} - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{Q_{residuo}}{A_W} \right) * d_{P,i} \right]}{B_W} \right\} * P_{Comb,i} - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{Q_{residuo}}{A_W} \right) * d_{M,i} \right]}{B_W} \right\} * P_{Comb,i} - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{Q_{residuo}}{A_W} \right) * d_{CN,i} \right]}{B_W} \right\} * P_{Comb,i} - \left\{ \frac{\left[\left(\frac{Q_{residuo}}{A_W} \right) * d_{R,i} \right]}{B_W} \right\} * P_{Comb,i} - Q_{residuo} * S_R * P_R - P_{Man,W,i} - P_{EPI,i} * Q_{EPI} * Q_K - K_{K,i} * Q_K \quad (13)$$

$$J_i = S_{Dep,maq,i} * P_{maq,i} \quad (14)$$

$$LAJIR_i = LB_i - G_{E,i} - G_{A,i} - G_{U,i} - G_{L,i} - G_{TI,i} - G_{MOE,i} * Q_{MOE} - J_i \quad (15)$$

$$LAIR_i = LAJIR_i - G_{F,i} \quad (16)$$

$$LL_i = LAIR_i - (S_{tl,S}) * LAIR_i \quad (17)$$

$$JAcum = \sum_i^{U_{HP}} J_i \quad (18)$$

$$VR_i = V_{CapG} + [(V_{Invest} - JAcum) - (JAcum - V_{Invest} * S_{lt,S}) + V_{ResVA} - (V_{ResVA} * S_{lt,S})] \quad (19)$$

$$FC_i = LL_i + J_i - V_{Amort,i} - V_{Invest,i} - V_{CapG,i} + V_{Finan,i} + VR_i \quad (20)$$

Além dos cálculos anteriormente mencionados, também foram calculados a TMA, o VPL e a TIR, conforme detalhado na seção 3.3.2. O cálculo da TMA para o modelo proposto foi vinculado ao WACC, Equação 4, conforme discutido na seção 3.2.2 deste estudo, assumindo uma estrutura de capital com 70% de capital próprio e 30% de capital de terceiros. Para calcular o custo de capital próprio (K_e) adotou-se o método CAPM (*Capital Asset Pricing Model*), Equação 5, conforme explicado na seção 3.2.2. A taxa livre de risco (R_f) foi determinada com base na série histórica dos últimos 10 anos da taxa Selic. A Selic representa a média dos juros praticados em operações compromissadas com títulos públicos federais, conforme definido pelo Banco Central do Brasil (2023). Dessa forma, a R_f foi calculada por meio da média aritmética, resultando em uma taxa de 9,06% a.a., com dados obtidos do site do Banco Central do Brasil (2024).

Já a taxa de retorno de mercado (R_m) foi estabelecida considerando a série histórica dos últimos 10 anos do Ibovespa, o principal e mais antigo indicador do mercado brasileiro (Leão, 2023). A determinação desse parâmetro envolveu o cálculo da média aritmética, resultando em uma taxa de 11,41% a.a., com dados provenientes do site da B3 (2024). Para o valor do beta desalavancado (β_u) foi consultado o site de Damodaram (2023), no qual foram selecionadas empresas norte-americanas do setor de Serviços Ambientais e de Resíduos (*Environmental & Waste Services*), resultando em um valor de 0,81. O beta alavancado foi calculado pela Equação 6, resultando em um valor de 1,04. Para determinar o custo de capital de terceiros (K_d) foi aplicada a Equação 7, conforme mencionado na seção 3.3.

A inflação histórica brasileira foi obtida considerando a série histórica dos últimos dois anos do IPCA (Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo), que é o índice

oficial de inflação do Brasil (IBGE, 2024). A determinação desse parâmetro envolveu o cálculo da média aritmética, resultando em uma taxa de 4,92% a.a., com dados provenientes do site do IBGE (2024). Quanto ao prêmio pelo risco de crédito (R_c) foi obtido a partir do site da Fundação Getúlio Vargas (2023) que registrou um índice de 9,28% a.a. Já o prêmio pelo risco do país (R_p) foi considerado nulo, visto que foram empregados dados do mercado interno. Todos os dados mencionados acima estão apresentados na Tabela 6, incluindo o resultado do cálculo do custo de capital próprio (K_e), do custo de capital de terceiros (K_d) e do WACC.

Para a implementação dos cenários, optou-se pela utilização da SMC, conforme detalhado nas seções 1 e 3.2.2. Foram realizadas 100.000 iterações por meio da SMC no FCI para cada cenário de RInt e RDesmont. Dado que se trata de uma simulação de viabilidade econômica, todas as equações matemáticas foram revisadas, além disso, o sistema simulado foi submetido a múltiplas execuções, visando assegurar a ausência de erros lógicos na simulação, a fim assegurar a verificação do modelo desenvolvido.

Tabela 6 - Dados do WACC

| Custo de Capital Próprio | |
|--|---------------|
| Retorno do ativo livre de risco (R_f) | 9,06% |
| Retorno esperado para a carteira de mercado (R_m) | 11,41% |
| Prêmio ($R_m - R_f$) | 2,35% |
| Proporção de capital próprio | 70,00% |
| Proporção de capital de terceiros | 30,00% |
| Taxa de IRPJ e CSLL | 34,00% |
| Beta desalavancado - Setor <i>Environmental & Waste Services</i> | 0,81 |
| Beta alavancado | 1,04 |
| Taxa de inflação | 4,92% |
| K_e | 11,51% |
| K_e real (descontando a inflação) | 6,28% |
| Custo Médio Ponderado de Capital (WACC) | |
| Prêmio pelo risco de crédito (R_c) | 9,28% |
| K_d | 18,34% |
| K_d nominal | 12,10% |
| K_d Real depois dos Impostos | 6,85% |
| WACC real depois dos impostos | 10,11% |
| WACC real antes dos impostos | 15,32% |

4.3 Fase de solução pelo modelo

Os cenários alternativos foram estabelecidos por meio de modificações nas variáveis de preços e distâncias. Essas alterações têm como objetivo verificar o comportamento dos VPLs e das quantidades que devem ser coletadas de REEE, a fim de tornar ambas as situações, RInt e RDesmont, viáveis economicamente. Ao todo, foram definidos nove cenários alternativos distintos em cada uma das situações, a fim de verificar o comportamento do VPL e da quantidade coletada. Os cenários 1 e 2 referem-se às variações nos preços, enquanto os cenários de 3 a 6 abrangem as variações nas distâncias percorridas para a venda. Já os cenários de 7 a 9 contemplam as variações nas distâncias percorridas tanto para a coleta quanto para a venda.

As Tabelas 8, 9 e 10 delinham as lógicas dos cenários alternativos na situação RInt, enquanto as Tabelas 11, 12 e 13 apresentam as lógicas dos cenários alternativos na situação RDesmont. Cabe ressaltar que nos cenários de 1 a 6, a distância percorrida no processo de coleta dos REEE não foi considerada, uma vez que a empresa de LR utilizada na implementação do modelo proposto aproveitará a rota de coleta dos outros resíduos.

Para a situação RInt, no cenário 1, em comparação com o cenário inicial, a alteração ocorreu no valor mínimo da variável preço de venda da peça inteira ($P_{Int,i}$), que foi reduzido em 20% em relação ao valor mais provável. Na variável preço do combustível ($P_{Comb,i}$), agora representada por uma distribuição triangular obtida a partir do *software Crystal Ball*®, essa representação acontece nos cenários 1 e 2 das situações RInt e RDesmont, o valor mínimo dessa variável passou a ser o valor mais provável reduzido em 10%, enquanto o valor máximo passou a ser o valor mais provável acrescido em 20%. No cenário 2, em relação ao cenário inicial, a alteração ocorreu no valor mínimo da variável $P_{Int,i}$, reduzido em 30% em relação ao valor mais provável. Na variável $P_{Comb,i}$, o valor mínimo passou a ser o valor mais provável reduzido em 10%, e o valor máximo passou a ser o valor mais provável acrescido em 30%. Conforme se verifica na Tabela 7.

Tabela 7 - Oscilação das variáveis preço na situação RInt

| Variáveis | Cenário 1 | | | Cenário 2 | | |
|------------|-----------|---------------|--------|-----------|---------------|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_{Int} | - 20% | - | + 10% | - 30% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - 10% | R\$ 6,29 | + 20% | - 10% | R\$ 6,29 | + 30% |
| d_{Int} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |

No cenário 3, em comparação com o cenário inicial, a variável distância percorrida para a venda da peça inteira ($d_{Int,i}$) teve seu valor mais provável reduzido pela metade, em relação ao cenário inicial. O valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do valor mais provável, e o valor máximo para 10% acima. No cenário 4, o valor mais provável de $d_{Int,i}$ foi duplicado em relação ao cenário inicial. Os valores mínimo e máximo foram ajustados em 10% abaixo e acima do valor mais provável, respectivamente.

No cenário 5, em relação ao cenário inicial, a variável $d_{Int,i}$ teve seu valor mais provável ajustado para três vezes o valor inicial. O valor mínimo foi reduzido em 10% em relação ao mais provável, enquanto o valor máximo foi aumentado em 10%. No cenário 6, o valor mais provável de $d_{Int,i}$ foi 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial. O valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do mais provável, e o valor máximo para 10% acima. Detalhes na Tabela 8.

Tabela 8 - Oscilação das variáveis distância de venda na situação RInt

| Variáveis | Cenário 3 | | | Cenário 4 | | |
|------------|-----------|--|--------|-----------|---|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_{Int} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - | - | - | - | - | - |
| d_{Int} | - 10% | Metade da distância do cenário inicial | + 10% | - 10% | Dobro da distância do cenário inicial | + 10% |
| Variáveis | Cenário 5 | | | Cenário 6 | | |
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_{Int} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - | - | - | - | - | - |
| d_{Int} | - 10% | Triplo da distância do cenário inicial | + 10% | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |

No cenário 7, introduziu-se a variável de distância percorrida para a coleta ($d_{coleta,i}$), cujo valor está detalhado na seção 4.1 deste estudo. O valor mínimo foi definido como 10% abaixo, enquanto o máximo foi 10% acima do valor mais provável. No cenário 8, a modificação foi realizada na variável $d_{coleta,i}$, elevando seu valor mais provável para 6 vezes a distância do cenário 7. O valor mínimo passou a ser o valor mais provável reduzido em 10%, e o valor máximo, o valor mais provável acrescido em 10%. No cenário 9, a variável $d_{coleta,i}$ assumiu um valor mais provável 6 vezes maior do que a distância do cenário 7, o valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do mais provável, e o valor máximo para 10% acima. A variável $d_{Int,i}$ foi alterada 5,5 a mais em relação ao cenário inicial, o valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do valor mais provável, e o

valor máximo para 10% acima. Esses detalhes estão apresentados de forma resumida na Tabela 9.

Tabela 9 - Oscilação das variáveis distância de coleta e venda na situação RInt

| Variáveis | Cenário 7 | | | Cenário 8 | | |
|--------------|-----------|---|---|-----------|---|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_{Int} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - | - | - | - | - | - |
| d_{coleta} | - 10% | Foi inserida a variável de distância da coleta | + 10% | - 10% | 6 vezes maior do que a distância do cenário 7 | + 10% |
| d_{Int} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| Variáveis | Cenário 9 | | | | | |
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_{Int} | - 10% | - | - | - | + 10% | + 10% |
| P_{Comb} | - | - | - | - | - | - |
| d_{coleta} | - 10% | 6 vezes maior do que a distância do cenário 7 | 6 vezes maior do que a distância do cenário 7 | - | + 10% | + 10% |
| d_{Int} | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | - | + 10% | + 10% |

Para a situação RDesmont, no cenário 1, em comparação com o cenário inicial, a alteração ocorreu no valor mínimo das variáveis P_P , $P_{M,i}$ e $P_{CN,i}$ que foi reduzido em 20% em relação ao valor mais provável. Na variável $P_{Comb,i}$, agora representada por uma distribuição triangular obtida a partir do *software Crystal Ball*®. O valor mínimo dessa variável passou a ser o valor mais provável reduzido em 10%, enquanto o valor máximo passou a ser o valor mais provável acrescido em 20%. Quanto a variável $P_{R,i}$, em comparação com o cenário inicial, o valor máximo foi ajustado para ser o valor mais provável acrescido em 20%. Conforme se verifica na Tabela 10.

Tabela 10 - Oscilação das variáveis preço nos cenários 1 e 2 na situação RDesmont

| Variáveis | Cenário 1 | | | Cenário 2 | | |
|------------|-----------|---------------|--------|-----------|---------------|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_P | - 20% | - | + 10% | - 30% | - | + 10% |
| P_M | - 20% | - | + 10% | - 30% | - | + 10% |
| P_{CN} | - 20% | - | + 10% | - 30% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - 10% | R\$ 6,29 | + 20% | - 10% | R\$ 6,29 | + 30% |
| P_R | - 10% | - | + 20% | - 10% | - | + 30% |
| d_P | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_M | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_{CN} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_R | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |

No cenário 2, Tabela 10, em relação ao cenário inicial, a alteração ocorreu no valor mínimo das variáveis $P_{P,i}$, P_M e $P_{CN,i}$ reduzido em 30% em relação ao valor mais provável. Na variável $P_{Comb,i}$ o valor mínimo passou a ser o valor mais provável reduzido em 10%, e o valor máximo passou a ser o valor mais provável acrescido em 30%. E na variável $P_{R,i}$ o valor máximo foi ajustado para ser o valor mais provável acrescido em 30%. No cenário 3, em comparação com o cenário inicial, as variáveis $d_{P,i}$, $d_{M,i}$, $d_{CN,i}$ e $d_{R,i}$ tiveram seus valores mais prováveis reduzidos pela metade, em relação ao cenário inicial. O valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do valor mais provável, e o valor máximo para 10% acima. No cenário 4, o valor mais provável das variáveis $d_{P,i}$, $d_{M,i}$, $d_{CN,i}$ e $d_{R,i}$ foram duplicados em relação ao cenário inicial. Os valores mínimo e máximo foram ajustados em 10% abaixo e acima do valor mais provável, respectivamente. Detalhes na Tabela 11.

Tabela 11 - Oscilação das variáveis distância de venda nos cenários 3 e 4 na situação RDesmont

| Variáveis | Cenário 3 | | | Cenário 4 | | |
|------------|-----------|-----------------------------|--------|-----------|----------------------------|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_P | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_M | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{CN} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_R | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_P | - 10% | Metade da distância inicial | + 10% | - 10% | Dobro da distância inicial | + 10% |
| d_M | - 10% | Metade da distância inicial | + 10% | - 10% | Dobro da distância inicial | + 10% |
| d_{CN} | - 10% | Metade da distância inicial | + 10% | - 10% | Dobro da distância inicial | + 10% |
| d_R | - 10% | Metade da distância inicial | + 10% | - 10% | Dobro da distância inicial | + 10% |

No cenário 5, em relação ao cenário inicial, as variáveis $d_{P,i}$, $d_{M,i}$, $d_{CN,i}$ e $d_{R,i}$ tiveram seus valores mais prováveis ajustados para três vezes o valor inicial. O valor mínimo foi reduzido em 10% em relação ao mais provável, enquanto o valor máximo foi aumentado em 10%. No cenário 6, o valor mais provável das variáveis $d_{P,i}$, $d_{M,i}$, $d_{CN,i}$ e $d_{R,i}$ foi 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial. O valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do mais provável, e o valor máximo para 10% acima. Conforme indicado na Tabela 12.

Tabela 12 - Oscilação das variáveis distância de venda nos cenários 5 e 6 na situação RDesmont

| Variáveis | Cenário 5 | | | Cenário 6 | | |
|------------|-----------|-----------------------------|--------|-----------|---|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_P | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_M | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{CN} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_R | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_P | - 10% | Triplo da distância inicial | + 10% | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |
| d_M | - 10% | Triplo da distância inicial | + 10% | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |
| d_{CN} | - 10% | Triplo da distância inicial | + 10% | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |
| d_R | - 10% | Triplo da distância inicial | + 10% | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |

No cenário 7, introduziu-se a variável d_{coleta} , cujo valor está detalhado na seção 4.1 deste estudo. O valor mínimo foi definido como 10% abaixo, enquanto o máximo foi 10% acima do valor mais provável. No cenário 8, a modificação ocorreu na variável d_{coleta} , elevando seu valor mais provável para 6 vezes a distância do cenário 7. O valor mínimo passou a ser o valor mais provável reduzido em 10%, e o valor máximo, o valor mais provável acrescido em 10%. De acordo com a Tabela 13.

Tabela 13 - Oscilação das variáveis distância de coleta e venda nos cenários 7 e 8 na situação RDesmont

| Variáveis | Cenário 7 | | | Cenário 8 | | |
|--------------|-----------|--|--------|-----------|---|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_P | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_M | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{CN} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| P_R | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_{coleta} | - 10% | Foi inserida a variável de distância da coleta | + 10% | - 10% | 6 vezes maior do que a distância do cenário 7 | + 10% |
| d_P | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_M | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_{CN} | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |
| d_R | - 10% | - | + 10% | - 10% | - | + 10% |

No cenário 9, a variável d_{coleta} assumiu um valor mais provável 6 vezes maior do que a distância do cenário 7, o valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do mais provável, e o valor máximo para 10% acima. As variáveis $d_{P,i}$, $d_{M,i}$, $d_{CN,i}$ e $d_{R,i}$ foram alteradas 5,5 a mais em relação ao cenário inicial, o valor mínimo foi ajustado para 10% abaixo do mais provável, e o valor máximo para 10% acima. Esses detalhes estão apresentados de forma resumida na Tabela 14.

Tabela 14 - Oscilação das variáveis distância de coleta e venda no cenário 9 na situação RDesmont

| Variáveis | Cenário 9 | | |
|--------------|-----------|---|--------|
| | Mínimo | Mais provável | Máximo |
| P_P | - 10% | - | + 10% |
| P_M | - 10% | - | + 10% |
| P_{CN} | - 10% | - | + 10% |
| P_{Comb} | - 10% | - | + 10% |
| P_R | - 10% | - | + 10% |
| d_{coleta} | - 10% | 6 vezes maior do que a distância do cenário 7 | + 10% |
| d_P | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |
| d_M | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |
| d_{CN} | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |
| d_R | - 10% | 5,5 vezes maior do que a distância do cenário inicial | + 10% |

A análise dos resultados em cada cenário será orientada pela quantidade de REEE o que deve ser coletada, levando em consideração a análise de risco, a fim de manter a probabilidade do VPL ser negativo o mais próximo possível de zero. A Tabela 15 apresenta as distribuições estatísticas dos cenários alternativos da situação RInt.

Tabela 15 - Cenários alternativos na situação RInt

| Cenário 1 - RInt | | | | | | |
|------------------|----------------------|----------|---------------|----------|-------|--------|
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,33 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Triangular | R\$ 5,68 | R\$ 6,31 | R\$ 7,57 | - | - |
| d_{Int} | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| Cenário 2 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,04 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |

| P_{Comb} | Triangular | R\$ 5,68 | R\$ 6,31 | R\$ 8,20 | - | - |
|------------------|----------------------|----------|---------------|----------|----------|----------|
| d_{Int} | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| Cenário 3 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{Int} | Triangular | 305,10 | 339,00 | 372,90 | - | - |
| Cenário 4 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{Int} | Triangular | 1220,40 | 1356,00 | 1491,60 | - | - |
| Cenário 5 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{Int} | Triangular | 1830,60 | 2034,00 | 2237,40 | - | - |
| Cenário 6 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{Int} | Triangular | 3356,10 | 3729,00 | 4101,90 | - | - |
| Cenário 7 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{coleta} | Triangular | 225,00 | 250,00 | 275,00 | - | - |
| d_{Int} | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| Cenário 8 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{coleta} | Triangular | 1350,00 | 1500,00 | 1650,00 | - | - |
| d_{Int} | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| Cenário 9 - RInt | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_{Int} | Triangular | R\$ 2,62 | R\$ 2,91 | R\$ 3,20 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| d_{coleta} | Triangular | 1350,00 | 1500,00 | 1650,00 | - | - |
| d_{Int} | Triangular | 3356,10 | 3729,00 | 4101,90 | - | - |

Já as Tabelas 16, 17 e 18 apresentam as distribuições estatísticas dos cenários alternativos das situações RDesmont. A Tabela 16 aborda as distribuições nos cenários 1 e 2, a Tabela 17 compreende as distribuições nos cenários de 3 a 6, enquanto a Tabela 18 contém as distribuições correspondentes aos cenários de 7 a 9.

Tabela 16 - Cenários alternativos 1 e 2 na situação RDesmont

| Cenário 1 - RDesmont | | | | | | |
|----------------------|----------------------|------------|---------------|------------|-------|--------|
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,32 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 2,80 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 28,00 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Triangular | R\$ 5,68 | R\$ 6,31 | R\$ 7,57 | - | - |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 180,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| d_M | Triangular | 271,80 | 302,00 | 332,20 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 739,80 | 822,00 | 904,20 | - | - |
| d_R | Triangular | 126,00 | 140,00 | 154,00 | - | - |
| Cenário 2 - RDesmont | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 3,78 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 2,45 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 24,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Triangular | R\$ 5,68 | R\$ 6,31 | R\$ 8,20 | - | - |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 195,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| d_M | Triangular | 271,80 | 302,00 | 332,20 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 739,80 | 822,00 | 904,20 | - | - |
| d_R | Triangular | 126,00 | 140,00 | 154,00 | - | - |

Tabela 17 - Cenários alternativos 1 ao 6 na situação RDesmont

| Cenário 3 - RDesmont | | | | | | |
|----------------------|----------------------|------------|---------------|------------|----------|----------|
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 305,10 | 339,00 | 372,90 | - | - |
| d_M | Triangular | 135,90 | 151,00 | 166,10 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 369,90 | 411,00 | 452,10 | - | - |
| d_R | Triangular | 63,00 | 70,00 | 77,00 | - | - |

| Cenário 4 - RDesmont | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 1220,40 | 1356,00 | 1491,60 | - | - |
| d_M | Triangular | 543,60 | 604,00 | 664,40 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 1479,60 | 1644,00 | 1808,40 | - | - |
| d_R | Triangular | 252,00 | 280,00 | 308,00 | - | - |

| Cenário 5 - RDesmont | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 1830,60 | 2034,00 | 2237,40 | - | - |
| d_M | Triangular | 815,40 | 906,00 | 996,60 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 2219,40 | 2466,00 | 2712,60 | - | - |
| d_R | Triangular | 378,00 | 420,00 | 462,00 | - | - |

| Cenário 6 - RDesmont | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 3356,10 | 3729,00 | 4101,90 | - | - |
| d_M | Triangular | 1494,90 | 1661,00 | 1827,10 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 4068,90 | 4521,00 | 4973,10 | - | - |
| d_R | Triangular | 693,00 | 770,00 | 847,00 | - | - |

Tabela 18 - Cenários alternativos 7 ao 9 na situação RDesmont

| Cenário 7 - RDesmont | | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|---------------|----------------------|---------------|--------------|---------------|
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_{coleta} | Triangular | 225,00 | 250,00 | 275,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| d_M | Triangular | 271,80 | 302,00 | 332,20 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 739,80 | 822,00 | 904,20 | - | - |

| d_R | Triangular | 126,00 | 140,00 | 154,00 | - | - |
|-----------------------------|----------------------|------------|---------------|------------|----------|----------|
| Cenário 8 - RDesmont | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_{coleta} | Triangular | 1350,00 | 1500,00 | 1650,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 610,20 | 678,00 | 745,80 | - | - |
| d_M | Triangular | 271,80 | 302,00 | 332,20 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 739,80 | 822,00 | 904,20 | - | - |
| d_R | Triangular | 126,00 | 140,00 | 154,00 | - | - |
| Cenário 9 - RDesmont | | | | | | |
| Variável | Tipo de distribuição | Mínimo | Mais provável | Máximo | Média | Escala |
| P_P | Triangular | R\$ 4,86 | R\$ 5,40 | R\$ 5,94 | - | - |
| P_M | Triangular | R\$ 3,15 | R\$ 3,50 | R\$ 3,85 | - | - |
| P_{CN} | Triangular | R\$ 31,50 | R\$ 35,00 | R\$ 38,50 | - | - |
| P_{Comb} | Logística | - | - | - | R\$ 6,29 | R\$ 0,08 |
| P_R | Triangular | R\$ 135,00 | R\$ 150,00 | R\$ 165,00 | - | - |
| d_{coleta} | Triangular | 1350,00 | 1500,00 | 1650,00 | - | - |
| d_P | Triangular | 3356,10 | 3729,00 | 4101,90 | - | - |
| d_M | Triangular | 1494,90 | 1661,00 | 1827,10 | - | - |
| d_{CN} | Triangular | 4068,90 | 4521,00 | 4973,10 | - | - |
| d_R | Triangular | 693,00 | 770,00 | 847,00 | - | - |

Com o objetivo de aprimorar a viabilidade econômica da situação RDesmont, que envolve múltiplas etapas de reciclagem, foram realizadas simulações para todos os cenários, implementando uma redução de 50% no tempo de desmontagem e trituração, diminuindo a execução de 20 para 10 minutos. A situação RDesmont com essa redução foi denominada como RDesmont50DT. É importante ressaltar que, nesta análise, as mesmas quantidades de REEE foram utilizadas para ambas as situações.

Outra proposta foi feita para aprimorar a situação RDesmont. Para isso, foram realizadas simulações para todos os cenários, incorporando uma redução de 75% nos tributos aplicados. Nessa análise, também foram utilizadas as mesmas quantidades de REEE para ambas as situações. A situação RDesmont com essa redução foi denominada como RDesmont75T.

Adicionalmente, realizou-se o cálculo da quantidade em quilogramas das emissões de CO₂ geradas pelo caminhão durante o transporte em cada cenário de ambos

os modelos, utilizando a Equação 1 apresentada na seção 2.3 deste estudo. Nesse cálculo, foi empregado o fator de emissão do poluente ($F_{e,i}$) fornecido pelo Ministério do Meio Ambiente – MMA (2011), sendo um valor igual a $445 \text{ g de CO}_2 \cdot \text{km}^{-1}$ (MMA, 2011).

4.4 Fase de implementação

Para o cumprimento da fase denominada ‘Implementação’, os resultados obtidos por meio da simulação serão apresentados a um dos sócios da empresa estudada.

5 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Este capítulo expõe, para ambos os modelos, os resultados da simulação, do cálculo da emissão de dióxido de carbono (CO_2) em quilogramas, e a quantificação da mão de obra necessária. Cumprindo assim a terceira fase intitulada Solução pelo modelo do método de simulação delineado por Mitroff *et al.* (1974). Inicialmente, realizou-se uma análise determinística com as quantidades de resíduos coletadas pela Empresa Alfa até o momento, totalizado em 3.529 kg por ano. Para ambas as situações, o VPL apresentou valores negativos: a situação RInt registrou -R\$ 23.822,75, enquanto a RDesmont apresentou -R\$ 117.781,15. Esses resultados indicam a inviabilidade do negócio ao considerar apenas a quantidade de resíduos coletada até o momento pela Empresa Alfa.

Além disso, observa-se que para atingir um VPL igual a zero na situação RInt, a empresa deverá coletar 6.230 kg de REEE, enquanto na RDesmont serão necessários 10.104 kg de REEE. Detalhes adicionais sobre a Demonstração do Resultado do Exercício (DRE) e o Fluxo de Caixa de Investimento (FCI) para ambos os modelos, na análise do VPL igual a 0, podem ser encontrados no Apêndice A.

Posteriormente, realizaram-se as análises estocásticas. Após a definição dos cenários alternativos, as situações foram implementadas seguindo todas as configurações e cálculos detalhados nas seções 3 e 4 deste estudo. As quantidades de REEE que cada cenário deve coletar tanto para RInt quanto para RDesmont, a fim de se tornarem economicamente viáveis, são apresentadas nas Tabelas 16 e 17, respectivamente. Essas tabelas incluem os resultados dos VPLs com seus valores mínimos, mais prováveis e máximos, bem como os resultados das TIRs e os valores das TMAs.

Conforme a Tabela 19, no cenário inicial, é necessário coletar anualmente 6.850 kg de REEE para que o processo seja economicamente viável. Isso é evidenciado pelos indicadores, como o VPL mais provável que apresentou um valor positivo de R\$ 4.009,61 e a TIR de 36,29%, superando o valor do WACC. No entanto, a análise de risco revelou uma probabilidade de 4,56% do VPL ser inferior a 0, com um VPL mínimo de -R\$ 2.239,14. Vale destacar que os cenários alternativos, cenário 1 e 2, envolveram alterações simultâneas nas variáveis de preço, como o preço de venda da peça inteira e o preço do combustível. Segundo a Tabela 16, no cenário 1, a quantidade necessária de REEE para tornar o processo economicamente viável é de 7.850 kg por ano, apresentando um VPL

mais provável positivo de R\$ 9.905,75 e uma TIR de 64,83%, superando o WACC. Em comparação ao cenário inicial, houve um aumento de 14,60% na quantidade coletada e um aumento de 147,05% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,64%, com um VPL mínimo de -R\$ 4.432,33.

No cenário 2, a quantidade necessária de REEE a ser coletada anualmente, com o propósito de tornar o processo economicamente viável, é de 8.660 kg. Isso resulta em um VPL mais provável positivo de R\$ 16.694,13 e uma TIR de 98,76%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, houve um aumento de 26,42% na quantidade coletada e um expressivo aumento de 316,35% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,86%, com um VPL mínimo de -R\$ 7.015,68.

Os cenários de 3 à 9 envolvem alterações nas variáveis de distância, com os cenários de 3 à 6 abordando a distância de venda e os cenários de 7 à 9 contemplando tanto a distância de coleta quanto a distância de venda da peça inteira. No cenário 3, a quantidade necessária de REEE para garantir a viabilidade econômica do processo é de 6.540 kg por ano. Isso resulta em um VPL mais provável positivo de R\$ 3.872,68 e uma TIR de 36,55%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, registrou-se uma diminuição de 4,53% na quantidade coletada e uma redução de 3,41% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,43%, com um VPL mínimo de -R\$ 1.753,89.

No cenário 4, a quantidade necessária de REEE para viabilizar economicamente o processo é de 8.120 kg por ano, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 4.808,73 e uma TIR de 36,56%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, observou-se um aumento de 18,54% na quantidade coletada e um acréscimo de 19,93% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,70%, com um VPL mínimo de -R\$ 3.853,18. No cenário 5, a quantidade necessária de REEE a fim de garantir a viabilidade econômica do processo é de 9.080 kg por ano, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 5.470,92 e uma TIR de 36,95%, ultrapassando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, houve um aumento de 32,55% na quantidade coletada e de 36,45% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,79%, com um VPL mínimo de -R\$ 4.358,70.

No cenário 6, a quantidade necessária de REEE anualmente para tornar o processo economicamente viável é de 13.280 kg, resultando em um VPL mais provável positivo

de R\$ 8.675,67 e uma TIR de 38,93%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, houve um aumento significativo de 93,87% na quantidade coletada e um acréscimo expressivo de 116,37% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,81%, com um VPL mínimo de -R\$ 9.639,49. No cenário 7, ao adicionar a distâncias de coleta, a quantidade anual necessária de REEE para garantir a viabilidade econômica do processo foi de 7.520 kg, gerando um VPL mais provável positivo de R\$ 4.441,14 e uma TIR de 36,49%, superando o valor do WACC. Comparando ao cenário inicial, observa-se um aumento de 9,78% na quantidade coletada e um acréscimo de 10,76% no VPL mais provável. O risco de um VPL negativo é de 4,44%, com um VPL mínimo de -R\$ 2.554,80.

No cenário 8, a quantidade anual necessária de REEE para garantir a viabilidade econômica do processo é de 9.300 kg, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 5.746,55 e uma TIR de 37,55%, superando o valor do WACC. Comparando com o cenário inicial, registra-se um aumento significativo de 35,77% na quantidade coletada, acompanhado de um incremento de 43,32% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,17%, com um VPL mínimo de -R\$ 4.482,47.

No último cenário, o cenário 9, que incorpora a maior distância total percorrida, a quantidade necessária de REEE por ano, com o objetivo de viabilizar economicamente o processo, é de 23.540 kg. Isso resulta em um VPL mais provável positivo de R\$ 15.939,38 e uma TIR de 39,87%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, observa-se um aumento considerável de 243,65% na quantidade coletada, acompanhado de um incremento notável de 297,53% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,87%, apresentando o maior VPL mínimo de -R\$ 19.253,61. Todas as distribuições estatísticas do VPL na situação RInt, juntamente com seus respectivos gráficos, estão detalhadas no Apêndice B.

Tabela 19 - Quantidade de REEE seus respectivos VPL e TIR na situação RInt

| Cenário | Quantidade de REEE coletada (Kg/ano) | Análise de risco probabilidade do VPL <0 | VPL | | | TIR | TMA | |
|--------------------------|--------------------------------------|--|---------------|----------------|---------------|---------------|--------|--------|
| | | | Mínimo | Mais provável | Máximo | | | |
| Cenário Inicial | 6.850 | 4,56% | -R\$ 2.239,14 | R\$ 4.009,61 | R\$ 10.187,47 | 36,29% | 15,32% | |
| Oscilação dos preços | Cenário 1 | 7.850 | 4,64% | -R\$ 4.432,33 | R\$ 9.905,75 | R\$ 17.103,89 | 64,83% | 15,32% |
| | Cenário 2 | 8.660 | 4,86% | -R\$ 7.015,68 | R\$ 16.694,13 | R\$ 24.478,17 | 98,76% | 15,32% |
| | Cenário 3 | 6.540 | 4,43% | -R\$ 1.753,89 | R\$ 3.872,68 | R\$ 9.524,08 | 36,55% | 15,32% |
| Oscilação das distâncias | Cenário 4 | 8.120 | 4,70% | -R\$ 3.853,18 | R\$ 4.808,73 | R\$ 13.051,89 | 36,56% | 15,32% |
| | Cenário 5 | 9.080 | 4,79% | -R\$ 4.358,70 | R\$ 5.470,92 | R\$ 16.211,54 | 36,95% | 15,32% |
| | Cenário 6 | 13.280 | 4,81% | -R\$ 9.639,49 | R\$ 8.675,67 | R\$ 27.073,36 | 38,93% | 15,32% |
| | Cenário 7 | 7.520 | 4,44% | -R\$ 2.554,80 | R\$ 4.441,14 | R\$ 11.518,47 | 36,49% | 15,32% |
| | Cenário 8 | 9.300 | 4,17% | -R\$ 4.482,47 | R\$ 5.746,55 | R\$ 16.216,35 | 37,55% | 15,32% |
| | Cenário 9 | 23.540 | 4,87% | -R\$ 19.253,61 | R\$ 15.939,38 | R\$ 50.476,08 | 39,87% | 15,32% |

De acordo com a Tabela 20 referente a situação RDesmont, no cenário inicial, é necessário coletar anualmente 18.410 kg de REEE para tornar o processo economicamente viável. Isso é evidenciado pelos indicadores, como o VPL mais provável que apresentou um valor positivo de R\$ 13.043,74 e a TIR de 21,65%, superando o valor do WACC. No entanto, a análise de risco revelou uma probabilidade de 4,37% do VPL ser inferior a 0, com um VPL mínimo de -R\$ 14.114,60.

Da mesma forma que na situação RInt, na situação RDesmont os cenários alternativos, cenário 1 e 2, envolveram alterações simultâneas nas variáveis de preço, como o preço de venda do plástico, preço de venda do metal, preço de venda dos componentes nobres, preço do combustível e preço para destinação dos rejeitos. Segundo a Tabela 17, no cenário 1, a quantidade necessária anualmente a fim de garantir a viabilidade econômica do processo de REEE é de 19.750 kg, com um VPL mais provável positivo de R\$ 21.888,06 e uma TIR de 31,39%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, houve um aumento de 7,28% na quantidade coletada e um aumento de 67,81% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,70%, com um VPL mínimo de -R\$ 26.541,03.

No cenário 2, a quantidade a ser coletada por ano de REEE com o propósito de viabilizar economicamente o processo é de 21.100 kg, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 31.852,78 e uma TIR de 42,12%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, houve um aumento de 14,61% na quantidade coletada e um aumento de 144,20% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,91%, com um VPL mínimo de -R\$ 38.354,68.

Os cenários de 3 à 9 do modelo 2, assim como no modelo 1, envolvem alterações nas variáveis de distância, incluindo distância de coleta, distância de venda de plástico, distância de venda de metal, distância de venda de componentes nobres e distância de destinação dos rejeitos. Os cenários de 3 à 6 abordam a distância de venda e os cenários de 7 à 9 contemplam tanto a distância de coleta quanto a distância de venda da peça inteira. No cenário 3, a quantidade anual necessária de REEE para assegurar a viabilidade econômica do processo é de 18.050 kg, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 12.624,55 e uma TIR de 21,51%, superando o valor do WACC. Comparado ao cenário inicial, observa-se uma diminuição de 1,96% na quantidade coletada e uma diminuição de 3,21% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,70%, com um VPL mínimo de -R\$ 14.383,41.

No cenário 4, a quantidade anual necessária de REEE para tornar o processo economicamente viável é de 19.410 kg, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 13.837,07 e uma TIR de 21,84%, superando o valor do WACC. Em comparação ao cenário inicial, registra-se um aumento de 5,43% na quantidade coletada e de 6,08% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,46%, com um VPL mínimo de -R\$ 17.011,22. No cenário 5, a quantidade anual necessária de REEE para alcançar a viabilidade econômica do processo é de 20.280 kg, gerando um VPL mais provável positivo de R\$ 14.827,11 e uma TIR de 22,14%, ultrapassando o valor do WACC. Comparado ao cenário inicial, isso representa um aumento de 10,16% na quantidade coletada e de 13,67% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,13%, com um VPL mínimo de -R\$ 17.706,64.

No cenário 6, a quantidade anual necessária de REEE para viabilizar economicamente o processo é de 22.780 kg, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 16.933,87 e uma TIR de 22,61%, superando o valor do WACC. Comparado ao cenário inicial, observa-se um aumento de 23,74% na quantidade coletada e de 29,82% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,31%, com um VPL mínimo de -R\$ 22.040,05. No cenário 7, ao adicionar distâncias de coleta, a quantidade anual necessária de REEE para garantir a viabilidade econômica do processo é de 18.740 kg, gerando um VPL mais provável positivo de R\$ 13.346,92 e uma TIR de 21,74%, superando o valor do WACC. Comparado ao cenário inicial, isso representa um aumento de 1,79% na quantidade coletada e de 2,32% no VPL mais provável. O risco de um VPL negativo é de 4,29%, com um VPL mínimo de -R\$ 16.008,72.

No cenário 8, a quantidade anual necessária de REEE para garantir a viabilidade econômica do processo é de 20.550 kg, resultando em um VPL mais provável positivo de R\$ 15.188,69 e uma TIR de 22,26%, superando o valor do WACC. Comparado ao cenário inicial, observa-se um aumento de 11,62% na quantidade coletada e de 16,44% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,01%, com um VPL mínimo de -R\$ 16.503,52.

No último cenário, o cenário 9, com a maior distância total percorrida, a quantidade anual necessária de REEE para buscar a viabilidade econômica do processo é de 34.620 kg, sendo a maior quantidade em ambos os modelos. Resulta em um VPL mais provável positivo de R\$ 25.428,45 e uma TIR de 22,56%, superando o valor do WACC. Comparado ao cenário inicial, observa-se um aumento de 88,05% na quantidade coletada e de 94,95% no VPL mais provável. O risco do VPL ser negativo é de 4,81%, apresentando o maior VPL mínimo de -R\$ 33.288,74. O Apêndice C apresenta as distribuições estatísticas do VPL para RDesmont, cada uma acompanhada de seu respectivo gráfico.

Tabela 20 - Quantidade de REEE seus respectivos VPL e TIR na situação RDesmont

| Cenário | Quantidade de REEE coletada (Kg/ano) | Análise de risco probabilidade e do VPL <0 | VPL | | | TIR | TMA | |
|---------------------------------|--------------------------------------|--|----------------|----------------|---------------|---------------|--------|--------|
| | | | Mínimo | Mais provável | Máximo | | WACC | |
| Cenário Inicial | 18.410 | 4,37% | -R\$ 14.114,60 | R\$ 13.043,74 | R\$ 40.427,06 | 21,65% | 15,32% | |
| Oscilação dos preços | Cenário 1 | 19.750 | 4,70% | -R\$ 26.541,03 | R\$ 21.888,06 | R\$ 61.591,94 | 31,39% | 15,32% |
| | Cenário 2 | 21.100 | 4,91% | -R\$ 38.354,68 | R\$ 31.852,78 | R\$ 88.985,80 | 42,12% | 15,32% |
| Oscilação das distâncias | Cenário 3 | 18.050 | 4,70% | -R\$ 14.383,41 | R\$ 12.624,55 | R\$ 40.504,91 | 21,51% | 15,32% |
| | Cenário 4 | 19.410 | 4,46% | -R\$ 17.011,22 | R\$ 13.837,07 | R\$ 43.300,52 | 21,84% | 15,32% |
| | Cenário 5 | 20.280 | 4,13% | -R\$ 17.706,64 | R\$ 14.827,11 | R\$ 45.417,15 | 22,14% | 15,32% |
| | Cenário 6 | 22.780 | 4,31% | -R\$ 22.040,05 | R\$ 16.933,87 | R\$ 53.974,90 | 22,61% | 15,32% |
| | Cenário 7 | 18.740 | 4,29% | -R\$ 16.008,72 | R\$ 13.346,92 | R\$ 42.284,88 | 21,74% | 15,32% |
| | Cenário 8 | 20.550 | 4,01% | -R\$ 16.503,52 | R\$ 15.188,69 | R\$ 46.473,63 | 22,26% | 15,32% |
| | Cenário 9 | 34.620 | 4,81% | -R\$ 33.288,74 | R\$ 25.428,45 | R\$ 84.254,30 | 22,56% | 15,32% |

A fim de comparar as duas situações, denominadas RInt e RDesmont, determinou-se quantidades iguais de REEE a serem coletadas para ambas. Posteriormente, foram realizadas simulações para todos os cenários na situação RInt e RDesmont, resultando nos valores mínimos, mais prováveis e máximos do VPL, os quais estão disponíveis na Tabela 21. É perceptível que RInt demonstra maior viabilidade, enquanto a situação RDesmont é mais arriscada, evidenciado pelos valores negativos do VPL mínimo em todos os cenários, indicando possíveis perdas. Essa situação ocorre na situação RInt somente no cenário 9, onde foram inseridas as maiores distâncias. Assim, verifica-se que

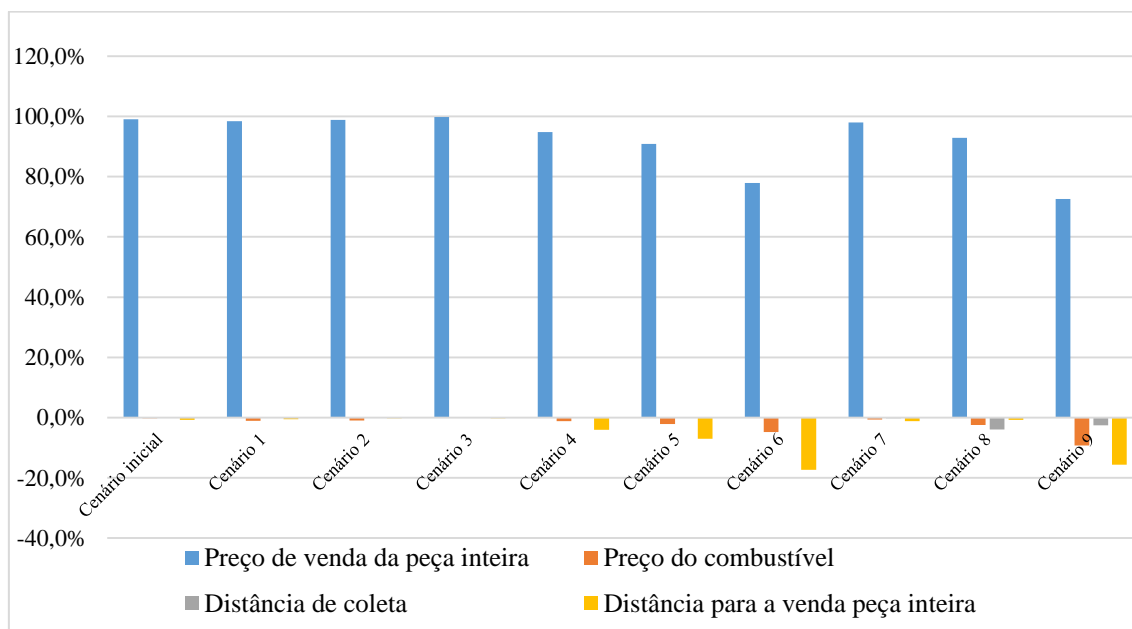
cenário 9 apresenta desafios consideráveis, resultando em VPL mínimo negativo para ambas as situações.

Tabela 21 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont

| Cenário | Quantidade de REEE coletada (Kg/ano) | VPL RInt | | | VPL RDesmont | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|---------------|---------------|
| | | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo | |
| Cenário Inicial | 18.410 | R\$ 74.651,91 | R\$ 91.046,28 | R\$ 107.825,35 | -R\$ 14.114,60 | R\$ 13.043,74 | R\$ 40.427,06 | |
| Oscilação dos preços | Cenário 1 | 19.750 | R\$ 66.347,92 | R\$ 102.229,49 | R\$ 120.240,04 | -R\$ 26.541,03 | R\$ 21.888,06 | R\$ 61.591,94 |
| | Cenário 2 | 21.100 | R\$ 55.376,42 | R\$ 111.074,53 | R\$ 129.847,89 | -R\$ 38.354,68 | R\$ 31.852,78 | R\$ 88.985,80 |
| | Cenário 3 | 18.050 | R\$ 79.931,33 | R\$ 95.412,51 | R\$ 110.943,77 | -R\$ 14.383,41 | R\$ 12.624,55 | R\$ 40.504,91 |
| Oscilação das distâncias | Cenário 4 | 19.410 | R\$ 64.608,32 | R\$ 84.660,42 | R\$ 104.410,17 | -R\$ 17.011,22 | R\$ 13.837,07 | R\$ 43.300,52 |
| | Cenário 5 | 20.280 | R\$ 55.125,90 | R\$ 77.185,06 | R\$ 98.031,94 | -R\$ 17.706,64 | R\$ 14.827,11 | R\$ 45.417,15 |
| | Cenário 6 | 22.780 | R\$ 15.375,10 | R\$ 47.684,36 | R\$ 81.313,68 | -R\$ 22.040,05 | R\$ 16.933,87 | R\$ 53.974,90 |
| | Cenário 7 | 18.740 | R\$ 70.089,15 | R\$ 88.367,01 | R\$ 105.459,36 | -R\$ 16.008,72 | R\$ 13.346,92 | R\$ 42.284,88 |
| | Cenário 8 | 20.550 | R\$ 54.314,81 | R\$ 76.311,59 | R\$ 97.951,48 | -R\$ 16.503,52 | R\$ 15.188,69 | R\$ 46.473,63 |
| | Cenário 9 | 34.620 | -R\$ 2.071,51 | R\$ 51.854,89 | R\$ 108.822,02 | -R\$ 33.288,74 | R\$ 25.428,45 | R\$ 84.254,30 |

Os resultados da análise de sensibilidade das variáveis com relação ao VPL nas situações RInt e RDesmont podem ser visualizados nos Gráficos 3 e 4, respectivamente. Na situação RInt, destaca-se que a variável que exerce maior influência sobre o VPL é o preço de venda da peça inteira, seguido pela distância para a venda da peça inteira, pelo preço do combustível e, por fim, pela distância de coleta.

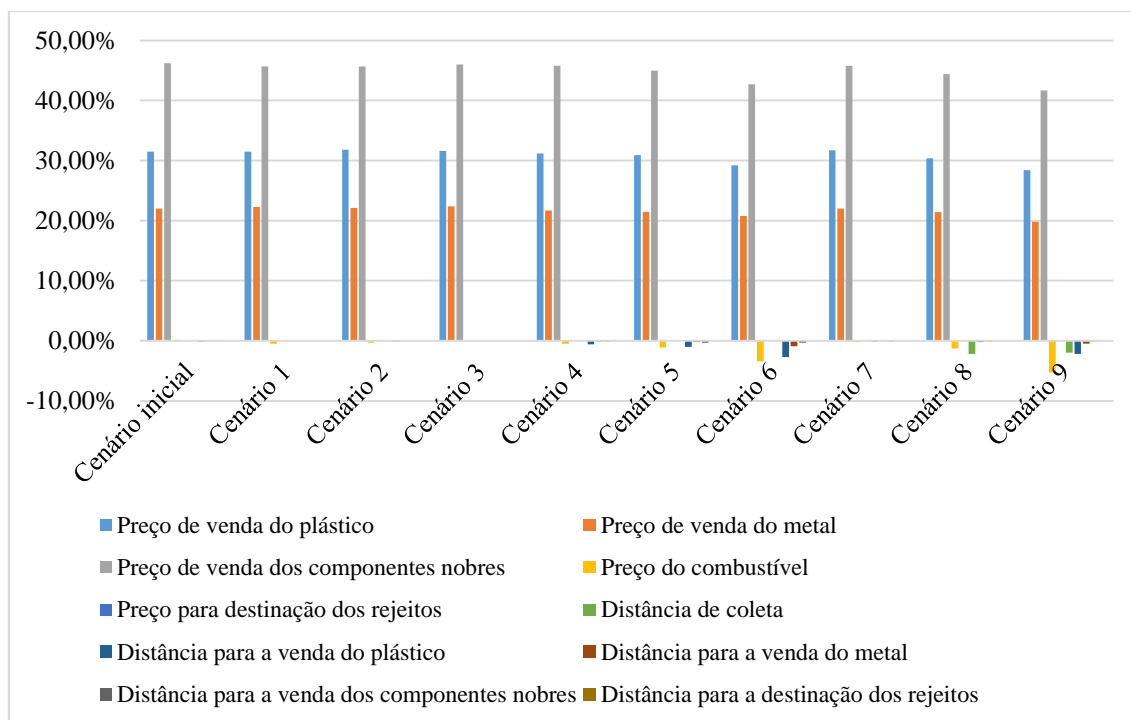
Gráfico 3 - Resultado da análise de sensibilidade na situação RInt



Já na situação RDesmont, Gráfico 4, três variáveis se destacam como as mais influentes sobre o VPL: preço de venda dos componentes nobres, preço de venda do plástico e preço de venda do metal. Em seguida, há outras três variáveis, embora

importantes apresentam um impacto relativamente menor. Estas variáveis são: preço do combustível, distância para a venda do plástico e distância para a venda do metal.

Gráfico 4 - Resultado da análise de sensibilidade na situação RDesmont



A Tabela 22 fornece uma visão abrangente dos resultados na situação RInt, abordando os aspectos econômicos, ambientais e sociais de cada cenário simulado. No contexto econômico, observa-se que os cenários 2, 1 e 3 exibem VPLs mais prováveis mais elevados em comparação com o cenário inicial. Nos cenários 1 e 2, onde ocorre a oscilação de preços (-20% e -30%, respectivamente), observa-se que mesmo com variações não muito elevadas, houve uma influência significativa nos valores do VPL. Ocorreu um aumento de 112,28% no VPL mais provável no cenário 1 em comparação ao cenário inicial, e um aumento de 122% no cenário 2 em relação ao cenário inicial. Esta análise é consistente com os resultados da análise de sensibilidade, que destacou os preços como as variáveis que mais impactam o VPL.

Os cenários com VPLs mais baixos estão associados a distâncias consideravelmente maiores, como evidenciado nos casos 6 e 9. No cenário 6, a distância de venda é 5,5 vezes maior que a do cenário inicial, resultando em uma redução de 47,63% no VPL mais provável. No cenário 9, tanto a distância de venda quanto a de coleta são 5,5 e 6 vezes maiores, respectivamente, em comparação ao cenário inicial, levaram a uma redução de 43,05% no VPL mais provável. Essas ampliações nas distâncias podem

impactar negativamente os aspectos econômicos devido aos custos de transporte. Vale ressaltar que o cenário 9 exibe o menor valor de VPL mínimo.

No que diz respeito aos aspectos ambientais, destaca-se que o cenário 9 registra a maior emissão de CO₂, vinculada às distâncias percorridas mais extensas, devido a maiores quantidades de REEE coletada. Em contraste, os cenários 3, 1 e 2, associados a menores distâncias percorridas, apresentam emissões de CO₂ mais baixas. Quanto aos aspectos sociais, o modelo 1 indica que, devido à ausência de um processo de desmontagem e trituração, não há geração de empregos adicionais na empresa estudada. Isso implica na utilização da mão de obra existente na empresa, preenchendo a ociosidade do sistema.

Tabela 22 - Resultado dos aspectos econômico, ambiental e social em RInt

| Cenário | Quantidade de REEE coletado (kg/ano) | Distância percorrida (km) | Aspecto Econômico | Aspecto Ambiental | Aspecto Social | |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------|--|--------------------|---|
| | | | VPL mais provável | Quantidade emitida de CO ₂ (kg) | Geração de emprego | |
| Cenário Inicial | 18.410 | 4.068 | R\$ 91.046,28 | 1.810,26 | 0 | |
| Oscilação dos preços | Cenário 1 | 19.750 | 4.068 | R\$ 102.229,49 | 1.810,26 | 0 |
| | Cenário 2 | 21.100 | 4.746 | R\$ 111.074,53 | 2.111,97 | 0 |
| Oscilação das distâncias | Cenário 3 | 18.050 | 2.034 | R\$ 95.412,51 | 905,13 | 0 |
| | Cenário 4 | 19.410 | 8.136 | R\$ 84.660,42 | 3.620,52 | 0 |
| | Cenário 5 | 20.280 | 12.204 | R\$ 77.185,06 | 5.430,78 | 0 |
| | Cenário 6 | 22.780 | 26.103 | R\$ 47.684,36 | 11.615,84 | 0 |
| | Cenário 7 | 18.740 | 5.568 | R\$ 88.367,01 | 2.477,76 | 0 |
| | Cenário 8 | 20.550 | 13.068 | R\$ 76.311,59 | 5.815,26 | 0 |
| | Cenário 9 | 34.620 | 52.290 | R\$ 51.854,89 | 23.269,05 | 0 |

A Tabela 23 apresenta os resultados na situação RDesmont, destacando *insights* relevantes em diferentes aspectos. No âmbito econômico, observa-se que os cenários mais viáveis, em termos de VPL, são os cenários 2, 9 e 1. No entanto, nota-se que esses cenários demandam uma coleta substancial de REEE para se tornarem economicamente viáveis. O cenário 9 se destaca ao integrar-se ao grupo de VPL superior, mas esse ganho econômico é acompanhado por um custo ambiental mais elevado, devido à extensa distância percorrida, resultando na maior emissão de CO₂ na situação RDesmont.

No que diz respeito aos aspectos ambientais, o cenário 9 lidera como o maior emissor de CO₂, seguido pelo cenário 6, devido aos maiores valores de distância percorrida. Por outro lado, os cenários 3, 1 e 2 registram as menores emissões, uma vez que apresentam as menores distâncias percorridas. Isso ressalta a importância da eficiência logística na gestão de resíduos eletrônicos. Na esfera social, observou-se a

necessidade de geração de empregos para efetuar o processo de desmontagem e trituração. O cenário 9 se destaca como o principal gerador de empregos.

Tabela 23 - Resultado dos aspectos econômico, ambiental e social em RDesmont

| Cenário | Quantidade de REEE coletado (kg/ano) | Distância percorrida (km) | Aspecto Econômico | Aspecto Ambiental | Aspecto Social |
|---------------------------------|--------------------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------|
| | | | VPL mais provável | Quantidade emitida de CO2 (kg) | Geração de emprego |
| Cenário Inicial | 18.410 | 3.224 | R\$ 13.043,74 | 1.434,68 | 2 |
| Oscilação dos preços | Cenário 1 | 19.750 | R\$ 21.888,06 | 1.434,68 | 2 |
| | Cenário 2 | 21.100 | R\$ 31.852,78 | 1.736,39 | 2 |
| Oscilação das distâncias | Cenário 3 | 18.050 | R\$ 12.624,55 | 717,34 | 2 |
| | Cenário 4 | 19.410 | R\$ 13.837,07 | 2.869,36 | 2 |
| | Cenário 5 | 20.280 | R\$ 14.827,11 | 5.209,17 | 2 |
| | Cenário 6 | 22.780 | R\$ 16.933,87 | 9.550,15 | 2 |
| | Cenário 7 | 18.740 | R\$ 13.346,92 | 2.102,18 | 2 |
| | Cenário 8 | 20.550 | R\$ 15.188,69 | 5.741,39 | 2 |
| | Cenário 9 | 34.620 | 43.512 | R\$ 25.428,45 | 19.362,84 |

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

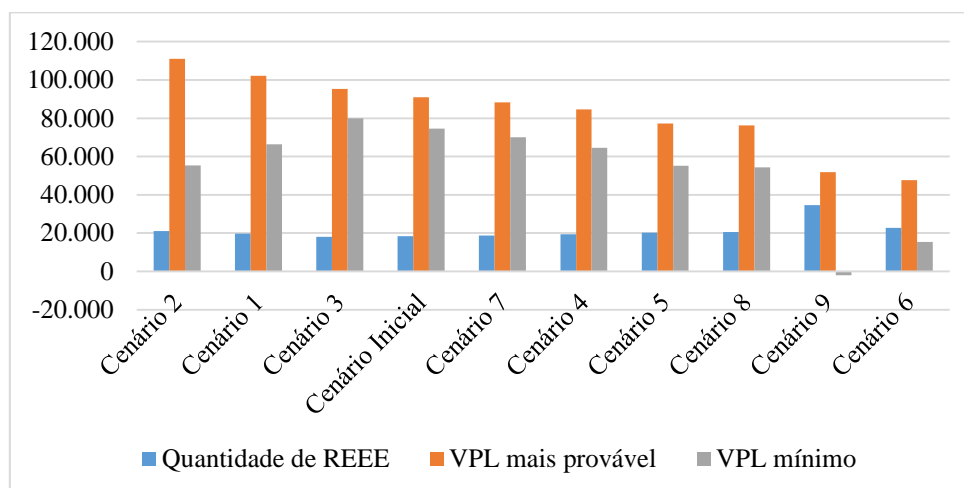
Neste capítulo, serão analisados os resultados obtidos a partir do modelo proposto. A quantidade de REEE a ser coletada, a fim de tornar o processo economicamente viável, variou significativamente de acordo com os diferentes cenários, evidenciando uma sensibilidade significativa às mudanças nas variáveis consideradas, como representado nos Gráficos 5 e 6 para as situações RInt e RDesmont, respectivamente.

Ao analisar ambas as situações coletando quantidades iguais de REEE, verifica-se que na RInt, os cenários 2, 1 e 3 se destacam, apresentando os três maiores valores de VPL mais provável. Nos cenários 1 e 2, nos quais ocorre a oscilação de preços (-20% e -30%, respectivamente), observa-se um aumento no VPL mais provável de 112,28% e 122%, respectivamente, em relação ao cenário inicial. Essa análise evidencia a sensibilidade do VPL às mudanças nos preços, mostrando que mesmo variações moderadas podem impactar significativamente os resultados do projeto. Essa análise é consistente com os resultados da análise de sensibilidade, que identificou os preços como as variáveis de maior influência no VPL.

No cenário 3, onde a distância de venda foi reduzida pela metade em relação ao cenário inicial, registrou-se um aumento de 4,80% no valor do VPL mais provável. Já no cenário 4, caracterizado pela duplicação da distância de venda em comparação ao cenário inicial, observou-se uma diminuição de 7,01% no VPL mais provável. No cenário 5, em que a distância de venda foi triplicada, verificou-se uma redução de 15,22% no valor do VPL mais provável. No cenário 6, com a distância de venda ampliada para 5,5 vezes a do cenário inicial, ocorreu uma diminuição de 47,63% no VPL mais provável.

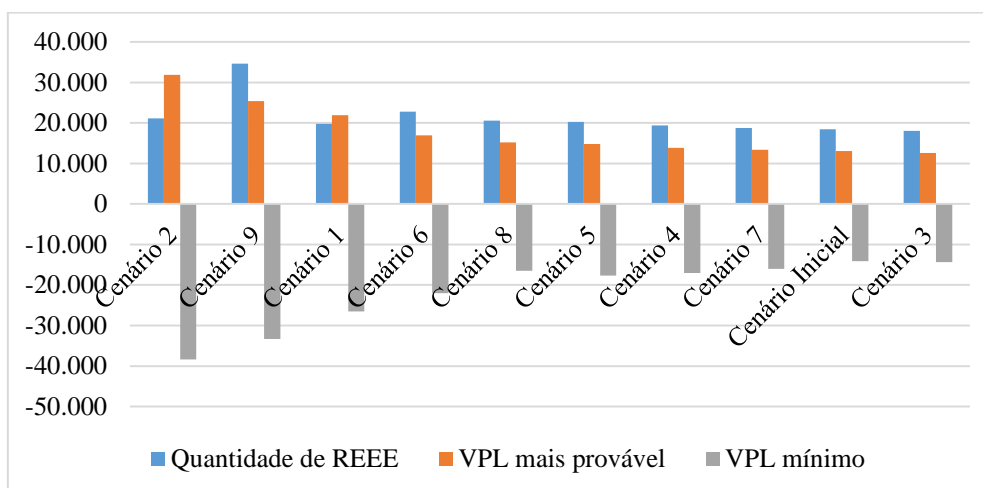
No cenário 7, ao incluir a distância de coleta em relação ao cenário inicial, constatou-se uma diminuição de 2,94% no valor do VPL mais provável. O cenário 8, marcado pela duplicação da distância de coleta em relação ao cenário 7, resultou em uma diminuição de 16,18% no VPL mais provável. No cenário 9, em que a distância de venda foi 5,5 vezes maior e a distância de coleta dobrou em relação ao cenário 7, observou-se uma redução de 43,05% no valor do VPL mais provável. Com isso, ficou evidente que os cenários com menores valores de VPL estão associados a distâncias consideravelmente maiores. É notável que, embora a variável de distância exerça uma influência negativa no VPL devido aos custos de transporte, de acordo com os resultados tal impacto não é tão significativo quanto ao impacto das variáveis de preço.

Gráfico 5 - Análise entre a quantidade, VPL mais provável e mínimo em RInt



Na situação RDesmont, verifica-se a presença significativa de valores negativos para o VPL mínimo em todos os cenários. Apesar do VPL mais provável do cenário 2 ser o mais elevado, o VPL mínimo ocupa a posição de destaque no ranking.

Gráfico 6 - Análise entre a quantidade, VPL mais provável e mínimo em RDesmont



Os resultados da análise de sensibilidade de ambos os modelos sugerem que, para melhorar a robustez dos modelos, seria crucial monitorar e gerenciar as flutuações nos preços de venda dos materiais e do combustível. Algo que é corroborado por Mairizal *et al.* (2023) em seus estudos, ao analisar a viabilidade econômica da reciclagem de placas de circuito impresso na Austrália, destaca a alta sensibilidade do VPL ao preço de mercado do metal. Além disso, considerações estratégicas para reduzir a distância para a venda dos materiais podem ter um impacto positivo nos cenários deste estudo.

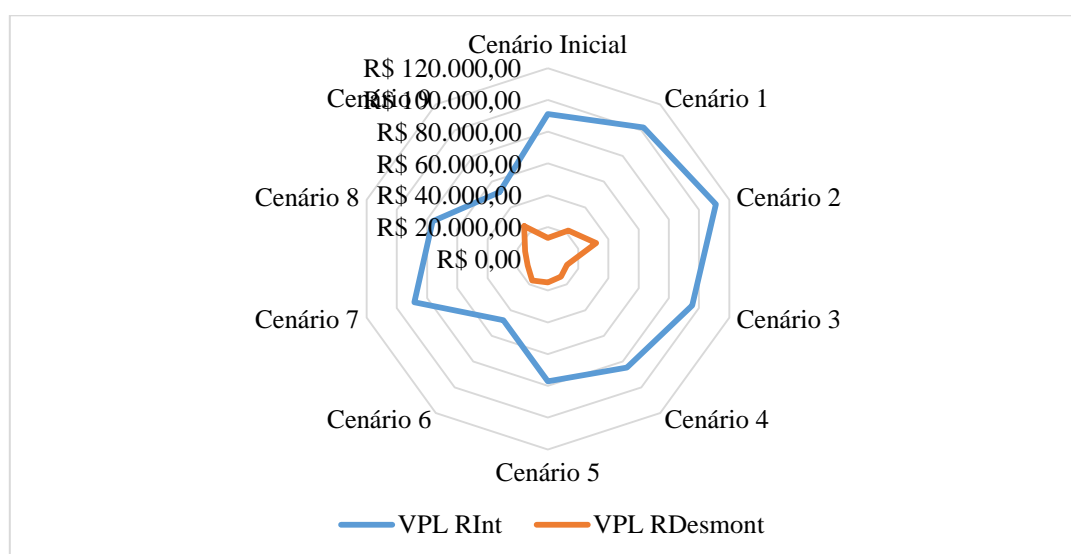
Em uma perspectiva mais abrangente, os resultados da simulação proporcionam uma reflexão relevante. Intuitivamente, pode-se supor que a situação RDesmont, devido

ao seu investimento mais elevado, resultaria em VPLs mais substanciais e vantajosos. No entanto, conforme evidenciado pelos resultados da simulação, essa premissa não se confirma necessariamente.

Observa-se que o maior investimento na situação RDesmont, juntamente com os preços de venda dos materiais nesta situação, que não se distanciam significativamente dos preços de venda da peça inteira da situação RInt, exceto pelo preço de venda dos componentes nobres, implicam na necessidade de coletar quantidades mais expressivas de REEE na RDesmont para compensar esses gastos e tornar o processo economicamente viável.

É importante notar que o aumento na quantidade de REEE coletado resulta em uma demanda proporcionalmente maior por mão de obra. Dentre os custos totais, destaca-se que o custo com mão de obra representou aproximadamente 65% do total dos custos. Essa constatação está alinhada com os estudos conduzidos por Magrini e Jagodzińska (2022), nos quais os custos de investimento foram identificados como os principais pontos críticos. Devido aos custos mais elevados em comparação com RInt, RDesmont apresenta valores de VPL inferiores. O Gráfico 7 exibe os valores do VPL mais provável nas situações RInt e RDesmont, quando ambas apresentam quantidades iguais de REEE a serem coletadas.

Gráfico 7 - RInt versus RDesmont



Já os resultados da situação RDesmont50DT estão apresentados na Tabela 24, onde contemplam os valores mínimos, mais prováveis e máximos do VPL. Após a redução de 50% no tempo de desmontagem e trituração, verifica-se que RDesmont50DT

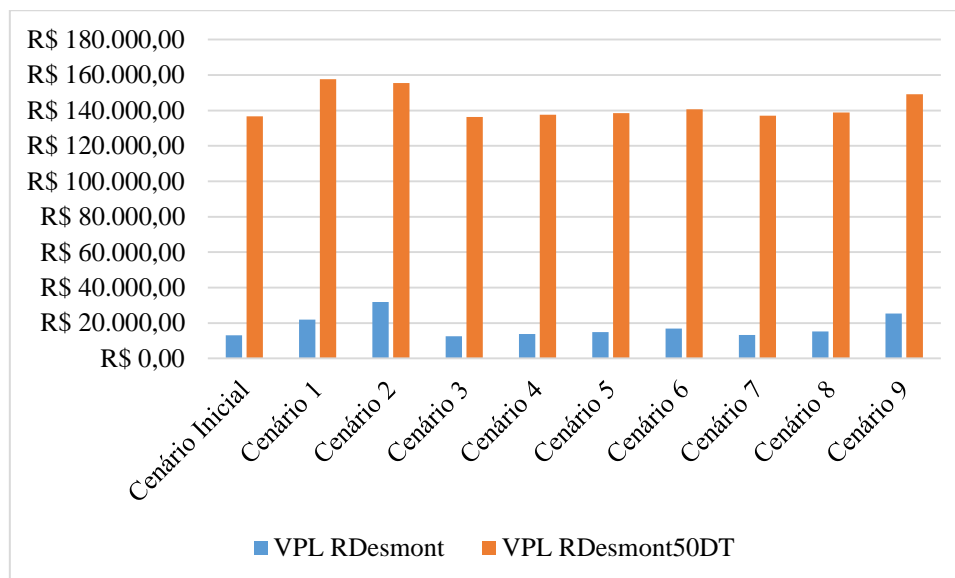
passou a evidenciar uma maior rentabilidade em relação a situação RInt. Isso é evidenciado pelos valores mais altos dos VPLs obtidos em RDesmont50DT quando comparados com RInt.

Tabela 24 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont50DT

| Cenário | Quantidade de REEE coletada (Kg/ano) | VPL RInt | | | VPL RDesmont50DT | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|----------|---------------|----------------|------------------|----------------|----------------|----------------|
| | | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo | |
| | Cenário Inicial | 18.410 | R\$ 74.651,91 | R\$ 91.046,28 | R\$ 107.825,35 | R\$ 107.770,83 | R\$ 136.769,15 | R\$ 164.852,37 |
| Oscilação dos preços | Cenário 1 | 19.750 | R\$ 66.347,92 | R\$ 102.229,49 | R\$ 120.240,04 | R\$ 98.092,53 | R\$ 157.603,73 | R\$ 185.292,31 |
| | Cenário 2 | 21.100 | R\$ 55.376,42 | R\$ 111.074,53 | R\$ 129.847,89 | R\$ 84.463,17 | R\$ 155.534,08 | R\$ 211.745,41 |
| | Cenário 3 | 18.050 | R\$ 79.931,33 | R\$ 95.412,51 | R\$ 110.943,77 | R\$ 110.042,56 | R\$ 136.349,96 | R\$ 162.127,46 |
| Oscilação das distâncias | Cenário 4 | 19.410 | R\$ 64.608,32 | R\$ 84.660,42 | R\$ 104.410,17 | R\$ 108.468,77 | R\$ 137.562,48 | R\$ 167.252,17 |
| | Cenário 5 | 20.280 | R\$ 55.125,90 | R\$ 77.185,06 | R\$ 98.031,94 | R\$ 106.477,09 | R\$ 138.552,52 | R\$ 169.034,23 |
| | Cenário 6 | 22.780 | R\$ 15.375,10 | R\$ 47.684,36 | R\$ 81.313,68 | R\$ 101.154,65 | R\$ 140.659,28 | R\$ 176.862,08 |
| | Cenário 7 | 18.740 | R\$ 70.089,15 | R\$ 88.367,01 | R\$ 105.459,36 | R\$ 109.359,85 | R\$ 137.072,33 | R\$ 165.122,72 |
| | Cenário 8 | 20.550 | R\$ 54.314,81 | R\$ 76.311,59 | R\$ 97.951,48 | R\$ 105.852,67 | R\$ 138.914,10 | R\$ 172.063,85 |
| | Cenário 9 | 34.620 | -R\$ 2.071,51 | R\$ 51.854,89 | R\$ 108.822,02 | R\$ 92.036,28 | R\$ 149.153,86 | R\$ 208.512,02 |

Comparando a situação RDesmont50DT com a RDesmont, Gráfico 8, observa-se um significativo aumento de 948,54% no valor do VPL mais provável no cenário inicial da RDesmont50DT. Nos cenários 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, os acréscimos foram de 620,04%, 388,29%, 980,04%, 894,16%, 834,45%, 730,64%, 927%, 814,59% e 486,56%, respectivamente. No geral, nota-se um aumento médio de 762,43% no valor do VPL mais provável, com um desvio padrão de 203,22%.

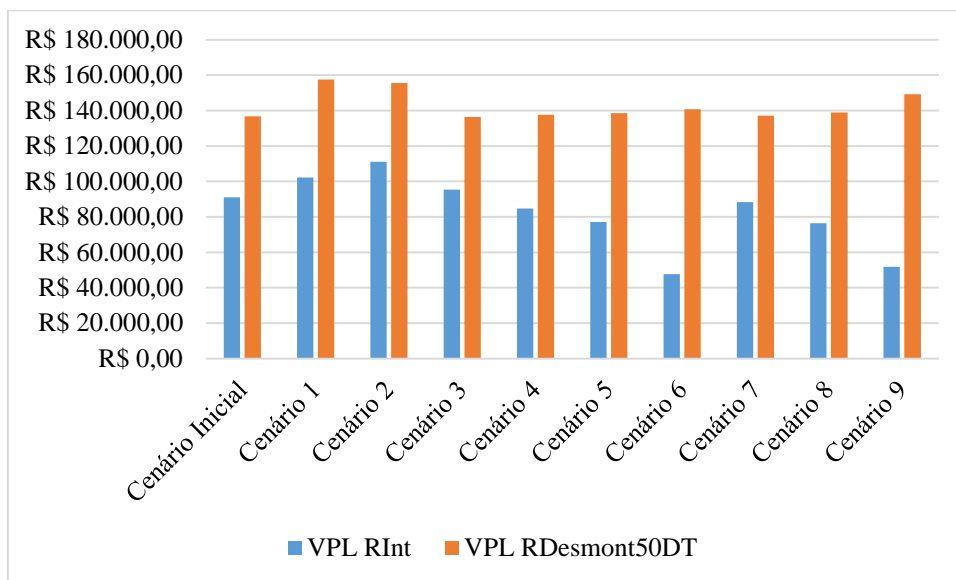
Gráfico 8 - Comparação dos VPL entre RDesmont e RDesmont50DT



Comparativamente, em relação a situação RInt, observa-se um aumento em todos os cenários da RDesmont50DT. O cenário inicial registrou um acréscimo de 50,22%, seguido pelos cenários 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, com aumentos de 54,17%, 40,03%, 42,91%,

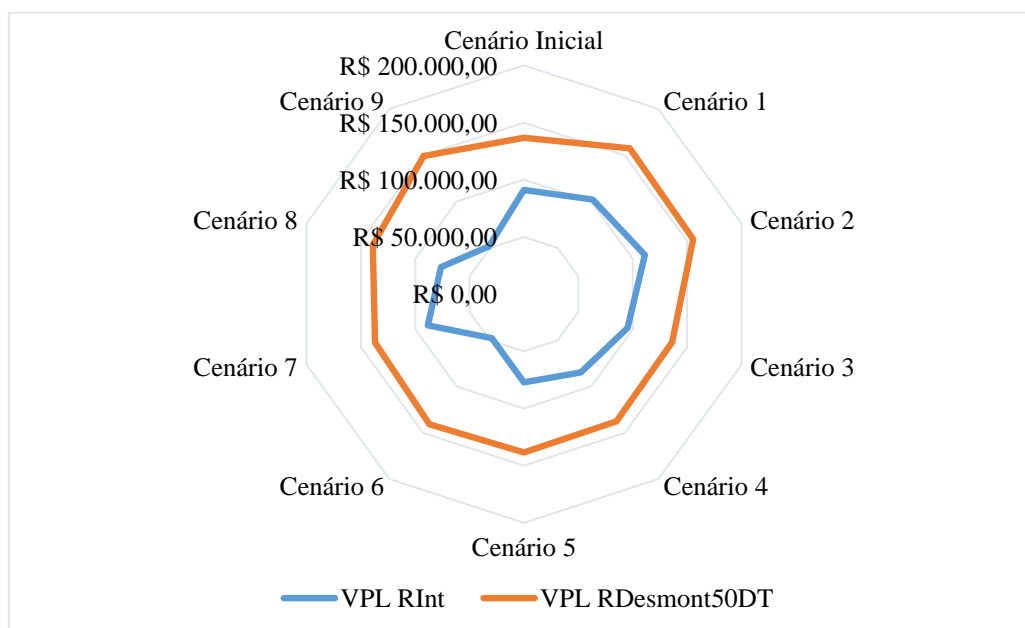
62,49%, 79,51%, 194,98%, 55,12%, 82,04% e 187,64%, respectivamente. No geral verifica-se um aumento médio de 84,91% no valor do VPL mais provável, com um desvio padrão de 57,76%, conforme Gráfico 9.

Gráfico 9 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont50DT



Dessa forma, conclui-se que uma redução de 50% no tempo de desmontagem e trituração é suficiente para tornar a situação RDesmont mais vantajosa em relação a RInt. O Gráfico 10 exibe os valores do VPL mais provável nas situações RInt e RDesmont50DT, quando ambas apresentam quantidades iguais de REEE a serem coletadas.

Gráfico 10 - RInt versus RDesmont50DT



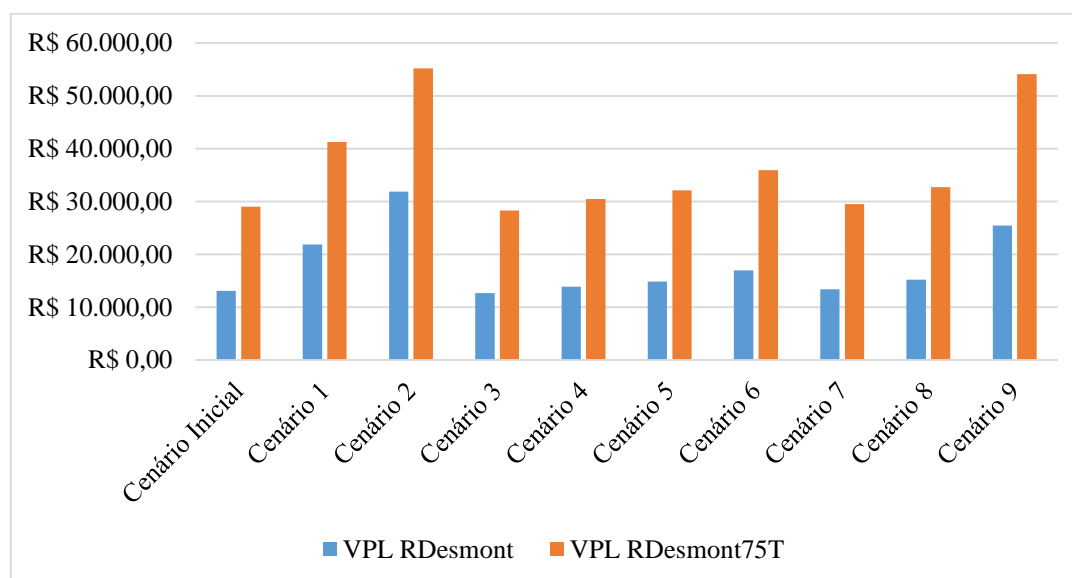
Os resultados da situação RDesmont75T estão apresentados na Tabela 25, no qual englobam os valores mínimos, mais prováveis e máximos do VPL. Após a redução dos tributos em 75%, destaca-se que RInt continua apresentando uma rentabilidade superior em quase todos os cenários, exceto no cenário 9, onde RDesmont75T superou os valores de RInt em 4,28%.

Tabela 25 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont75T

| Cenário | Quantidade de REEE coletada (kg/ano) | VPL RInt | | | VPL RDesmont75T | | | |
|--------------------------|--------------------------------------|---------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|---------------|----------------|
| | | Mínimo | Mais provável | Máximo | Mínimo | Mais provável | Máximo | |
| Cenário Inicial | 18.410 | R\$ 74.651,91 | R\$ 91.046,28 | R\$ 107.825,35 | -R\$ 9.624,15 | R\$ 28.986,30 | R\$ 66.436,68 | |
| Oscilação dos preços | Cenário 1 | 19.750 | R\$ 66.347,92 | R\$ 102.229,49 | R\$ 120.240,04 | -R\$ 29.905,64 | R\$ 41.237,51 | R\$ 94.835,71 |
| | Cenário 2 | 21.100 | R\$ 55.376,42 | R\$ 111.074,53 | R\$ 129.847,89 | -R\$ 48.092,67 | R\$ 55.166,80 | R\$ 131.491,47 |
| | Cenário 3 | 18.050 | R\$ 79.931,33 | R\$ 95.412,51 | R\$ 110.943,77 | -R\$ 10.302,81 | R\$ 28.280,82 | R\$ 65.198,17 |
| | Cenário 4 | 19.410 | R\$ 64.608,32 | R\$ 84.660,42 | R\$ 104.410,17 | -R\$ 8.187,36 | R\$ 30.439,39 | R\$ 71.244,24 |
| Oscilação das distâncias | Cenário 5 | 20.280 | R\$ 55.125,90 | R\$ 77.185,06 | R\$ 98.031,94 | -R\$ 10.957,70 | R\$ 32.112,90 | R\$ 75.752,56 |
| | Cenário 6 | 22.780 | R\$ 15.375,10 | R\$ 47.684,36 | R\$ 81.313,68 | -R\$ 14.801,12 | R\$ 35.914,13 | R\$ 91.622,81 |
| | Cenário 7 | 18.740 | R\$ 70.089,15 | R\$ 88.367,01 | R\$ 105.459,36 | -R\$ 9.452,72 | R\$ 29.522,31 | R\$ 69.291,46 |
| | Cenário 8 | 20.550 | R\$ 54.314,81 | R\$ 76.311,59 | R\$ 97.951,48 | -R\$ 9.526,91 | R\$ 32.706,43 | R\$ 78.435,11 |
| | Cenário 9 | 34.620 | -R\$ 2.071,51 | R\$ 51.854,89 | R\$ 108.822,02 | -R\$ 26.315,85 | R\$ 54.075,44 | R\$ 132.737,83 |

Ao comparar a situação RDesmont75T à RDesmont, Gráfico 11, observa-se um aumento significativo de 122,22% no valor do VPL mais provável no cenário inicial da RDesmont75T. Nos cenários 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9, os acréscimos foram de 88,40%, 73,19%, 124,01%, 119,98%, 116,58%, 112,08%, 121,19%, 115,33% e 112,66%, respectivamente. No geral, percebe-se um aumento médio de 110,57% no valor do VPL, com um desvio padrão de 16,57%.

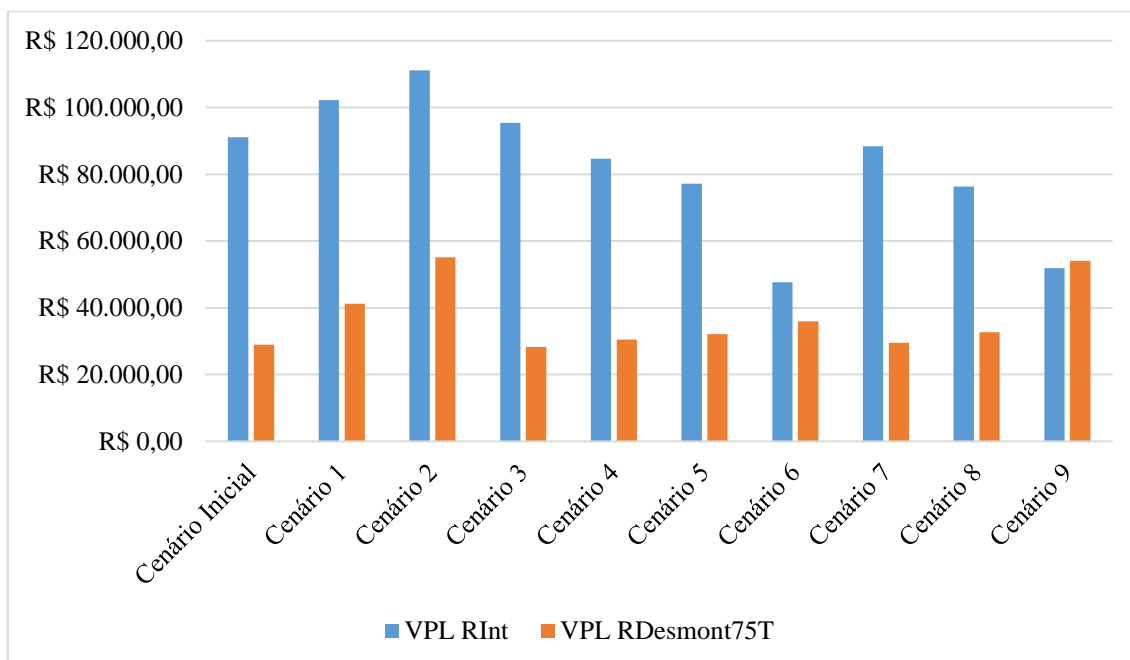
Gráfico 11 - Comparação dos VPL entre RDesmont e RDesmont75T



Embora os valores dos VPLs tenham melhorado em RDesmont75T, verifica-se que o VPL mais provável do cenário inicial é 68,16% inferior ao VPL mais provável em

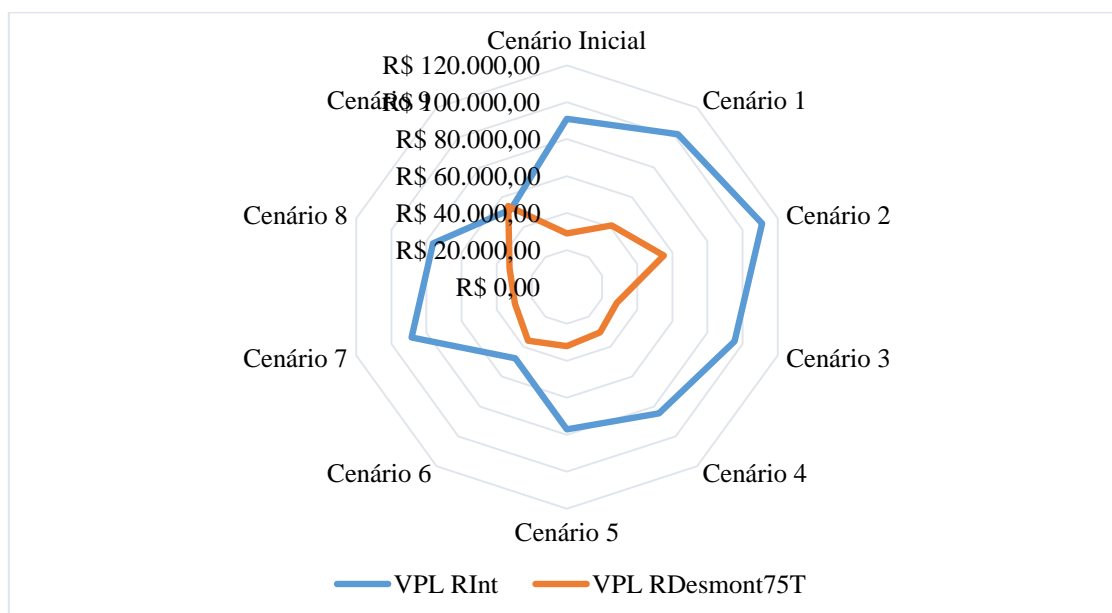
RInt. Essa condição se mantém nos demais cenários, onde os percentuais são 59,66%, 50,33%, 70,36%, 64,05%, 58,39%, 24,68%, 66,59% e 57,14% nos cenários 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, conforme Gráfico 12.

Gráfico 12 - Comparação dos VPL entre RInt e RDesmont75T



Dessa forma, conclui-se que uma redução de 75% nos tributos não é suficiente para tornar a situação RDesmont mais vantajosa em relação a RInt. O Gráfico 13 exibe os valores do VPL mais provável nas situações RInt e RDesmont75T, quando ambas apresentam quantidades iguais de REEE a serem coletadas.

Gráfico 13 - RInt versus RDesmont75T



Na situação RDesmont, ao analisar os aspectos econômicos, Tabela 23, os cenários 6 e 9 destacam-se por apresentar um aumento significativo no impacto econômico em comparação com os demais cenários, nos quais ocorreram oscilações nas variáveis de distância. Contudo, é crucial observar que, embora haja uma melhoria econômica, há uma elevação considerável nas emissões de CO₂. A nível social, verificou-se que a criação de empregos é extremamente suscetível a mudanças na quantidade de REEEs coletados.

7 CONCLUSÕES

O objetivo central desta dissertação consistiu em desenvolver um modelo matemático, Equação 20, empregando a Simulação de Monte Carlo (SMC), para avaliar a viabilidade econômica da LR aplicada aos REEEs, em duas situações. A primeira situação envolve apenas a coleta e venda das peças inteiras dos REEEs, referida como RInt; enquanto a segunda inclui a coleta, pré-tratamento, trituração e venda, designada como RDesmont. Para alcançar esse objetivo, foram exploradas as oscilações nas variáveis do processo, a partir das distribuições estatísticas, visando determinar a quantidade ideal de resíduos a ser coletada para tornar o processo economicamente viável. O modelo, ao levar em consideração as oscilações das variáveis, proporcionou suporte ao processo decisório.

A implementação prática do modelo foi realizada por meio do software *Microsoft Excel*®, para a construção do Fluxo de Caixa Incremental (FCI) a partir do modelo matemático proposto. Também foi empregado o *software Crystal Ball*®, para a construção da Simulação de Monte Carlo. Para a execução do modelo, optou-se por uma empresa já estabelecida na gestão de alguns tipos de resíduos. Nesse contexto, foram comparadas duas situações, denominadas RInt e RDesmont, que envolveram: realizar apenas a coleta e venda das peças inteiras dos REEEs ou executar o processo de coleta, pré-tratamento, trituração e venda, respectivamente.

Os resultados deste estudo oferecem dados detalhados sobre a LR de REEE nas situações RInt e RDesmont. Essas informações são essenciais para uma compreensão das práticas de gestão de resíduos. Além disso, o modelo desenvolvido pode ser aplicado por profissionais industriais para estabelecer metas, tomar decisões, inovar e aprimorar processos. Este modelo também se revela útil para pesquisadores em análises de viabilidade econômica, com potencial de aplicação em outras cidades, proporcionando uma abordagem flexível e adaptável a diferentes realidades.

Quanto aos resultados obtidos a partir do modelo proposto, a análise determinística revelou que, até o momento, coletando uma quantidade total de REEE de 3.529 k, nenhuma das duas situações, RInt e RDesmont, se mostrariam economicamente viáveis. Ambas apresentaram VPLs negativos, totalizando -R\$ 23.822,75 para a situação RInt e -R\$ 117.781,15 para a situação RDesmont. Para alcançar um VPL igual a zero, ou seja, viabilizar ambas as situações, a empresa precisaria coletar 6.230 kg de REEE na situação RInt, representando um aumento necessário na coleta de 76,54%. Já na

RDesmont, seriam necessários 10.104 kg de REEE, demandando um aumento na coleta de 186,31%.

É importante ressaltar que, atualmente, os preços de venda dos materiais em RDesmont não apresentam uma diferença significativa em relação aos preços da peça inteira na situação RInt, com exceção dos componentes nobres. Uma sugestão de melhoria para o cenário atual seria aumentar os preços de venda na situação RDesmont. Isso se justifica pelo fato de que os REEEs passam por um processo de desmontagem e trituração em RDesmont, ao contrário do que ocorre em RInt. Aumentar os preços de venda nessas condições não apenas estimularia a coleta de uma quantidade maior de materiais, mas também contribuiria significativamente para a sustentabilidade ambiental.

Foi evidenciado também pelos resultados da simulação, análise estocástica, que um investimento mais elevado em um projeto não necessariamente resulta em VPLs superiores. Na situação RDesmont, o maior investimento, aliado aos preços de venda dos materiais que não se distanciam significativamente dos preços da peça inteira na situação RInt (exceto pelos componentes nobres), exige uma coleta mais expressiva de REEE para compensar esses custos e viabilizar economicamente o processo. No entanto, essa maior coleta implica no aumento da mão de obra e, conseqüentemente, na elevação dos custos. Dos custos totais, vale ressaltar que o gasto com mão de obra correspondeu a cerca de 65% do montante total. Comparativamente, a situação RDesmont apresenta VPLs inferiores devido aos custos mais altos, indicando que a RInt pode ser mais lucrativa se os custos de reciclagem da RDesmont persistirem elevados.

Diante disso, foram realizadas simulações para todos os cenários na situação RDesmont, implementando uma redução de 50% no tempo de desmontagem e trituração, a situação RDesmont com essa redução foi denominada RDesmont50DT. Como resultado, observa-se que RDesmont50DT passou a apresentar uma rentabilidade superior em relação a situação RInt. De maneira geral, nota-se um aumento médio de 84,91% no valor do VPL mais provável, com um desvio padrão de 57,76%, ao comparar RDesmont50DT com RInt. Dessa forma, uma sugestão de melhoria para a situação RDesmont refere-se à fase de desmontagem. O tempo de desmontagem tem impacto direto na quantidade de mão de obra necessária, influenciando os custos e os valores do VPL, conforme evidenciado nos resultados da seção 5 e 6 desta dissertação.

As barreiras da desmontagem e separação surgem de um design complexo, portanto projetar os EEEs de forma que possam ser abertos facilmente ajudaria na desmontagem, e poderia reduzir os custos associados a reciclagem. A introdução de regulamentações nos produtos e requisitos poderia facilitar esse processo. Diante disso, torna-se evidente que a melhoria dessa situação requer coordenação em toda a cadeia de abastecimento de EEE, com os fabricantes de componentes no início da cadeia reconhecendo a necessidade de uma circularidade mais eficaz, e compreendendo os desafios enfrentados pelos processadores de resíduos mais adiante na cadeia reversa.

Outra análise foi conduzida com o intuito de melhorar a situação RDesmont, desta vez relacionada aos tributos. Para isso, foram realizadas simulações para todos os cenários, incorporando uma redução de 75% nos tributos aplicados. A situação resultante, denominada RDesmont75T, revelou uma melhoria nos valores dos VPLs. No entanto, RInt continuou apresentando uma rentabilidade superior em quase todos os cenários, exceto no cenário 9, onde RDesmont75T superou os valores de RInt em 4,28%. Assim, conclui-se que a implementação de incentivos econômicos, tais como isenções ou reduções fiscais, embora benéfica, por si só não é suficiente para conferir à situação RDesmont uma viabilidade econômica superior à RInt.

Quanto a emissão de CO₂ verifica-se que há uma interconexão entre os aspectos econômicos e ambientais. Como o caso na situação RDesmont, que embora o cenário 9 se destaque ao apresentar um VPL superior (R\$2.5428,25), esse ganho econômico vem acompanhado de um custo ambiental mais elevado, devido a extensa distância percorrida, resultando em maior emissão de CO₂. Em síntese, este estudo destaca a necessidade de ponderar cuidadosamente os *trade-offs* entre benefícios econômicos e impactos ambientais ao tomar decisões estratégicas.

A análise destaca a interconexão entre os aspectos econômicos, ambientais e sociais, enfatizando a importância de considerar variáveis como oscilação de preços e distâncias percorridas para uma tomada de decisão equilibrada e sustentável. Em resumo, os resultados da simulação apontam para a necessidade de ponderar cuidadosamente os *trade-offs* entre benefícios econômicos, impactos ambientais e considerações sociais ao tomar decisões estratégicas.

Em relação ao meio acadêmico, a consideração da SMC como um método viável para apoiar as decisões alinha-se com outras contribuições encontradas na literatura. Por

exemplo, a pesquisa efetuada por D'Adamo *et al.* (2019) que analisaram a viabilidade econômica dos processos de reciclagem hidrometalúrgicos em pequenas e médias empresas. O estudo de Gonçalves *et al.* (2022) no qual analisaram a viabilidade econômica de dois tipos de sistemas fotovoltaicos, enquanto Kumar *et al.* (2021) conduziram uma análise abrangente da viabilidade econômica de uma biorrefinaria.

Embora os estudos previamente mencionados tenham explorado o uso da SMC na análise de viabilidade econômica, é importante notar que as propostas finais de aplicação da SMC são específicas para cada caso. Portanto, qualquer tentativa de comparação direta das recomendações finais desses estudos seria inadequada devido às particularidades inerentes a cada abordagem proposta.

Assim, as questões de pesquisa abordadas nesta dissertação encontram respostas. A análise do modelo proposto verificou a viabilidade econômica na LR de REEE em ambas as situações, contanto que as quantidades previamente identificadas pelo modelo sejam coletadas.

7.1 Trabalhos futuros

Como proposta para trabalhos futuros, sugere-se a realização de uma análise mais estratificada dos preços de cada um desses materiais. Isso se torna relevante, pois a análise de sensibilidade deste estudo revelou que o preço desses componentes influencia significativamente no VPL na situação RDesmont.

Além disso, sugere-se para estudos futuros, a expansão da aplicação do modelo matemático desta dissertação em diversas regiões do país, visando ampliar a abrangência dos resultados. Adicionalmente, propõe-se a exploração desse modelo em relação a outros tipos de resíduos, contribuindo no entendimento mais abrangente de sua aplicabilidade em contextos variados.

REFERÊNCIAS

- ACHILLAS, Ch.; VLACHOKOSTAS, Ch.; MOUSSIOPOULOS, N.; BANIAS, G.. 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, maio 2010.
- AGRAWAL, R.; BHAGIA, S.; SATLEWAL, A.; RAGAUSKAS, A. J. Urban mining from biomass, brine, sewage sludge, phosphogypsum and e-waste for reducing the environmental pollution: current status of availability, potential, and technologies with a focus on lca and tea. **Environmental Research**, v. 224, p. 1-15, maio 2023.
- AGRAWAL, S.; SINGH, R. K.; MURTAZA, Q. A literature review and perspectives in reverse logistics. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 97, p. 76–92, 2015.
- AKRAM, R.; NATASHA; FAHAD, S.; HASHMI, M. Z.; WAHID, A.; ADNAN, M.; MUBEEN, M.; KHAN, N.; REHMANI, M. I. A.; AWAIS, M. Trends of electronic waste pollution and its impact on the global environment and ecosystem. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 26, n. 17, p. 16923-16938, 25 abr. 2019.
- ALBUQUERQUE, C. A.; MELLO, C. H. P.; GOMES, J. H. F.; SANTOS, V. C. Bibliometric analysis of studies involving e-waste: a critical review. **Environmental Science And Pollution Research**, v. 28, n. 35, p. 47773-47784, 22 jul. 2021.
- ALMEIDA, I. T. G. V.; RIBEIRO, A. R. B.; RAMALHO, L. L.; ARAUJO, R. S. C.; FLORIANO, L. S. Economia circular e logística reversa: uma revisão sistemática. In: Encontro Internacional Sobre Gestão Empresarial E Meio Ambiente (ENGEMA), 24, 2022, São Paulo. **XXIV ENGEMA**. São Paulo: USP, 2022. p. 1-16.
- ALVAREZ, R. R.; ANTUNES JUNIOR, A. V. A. V. **Takt-time: conceitos e contextualização dentro do Sistema Toyota de Produção**. Gestão e produção, v. 8, n. 1, p. 1–18, 2001.
- AMIRDADI, M.; DEHGHANIAN, F.; KOHNEH, J. N. Design and development of a fuzzy credibility-based reverse logistics network with buyback offers: A case study. **Waste Management and Research**, v. 40, n. 7, p. 1069–1084, 2022.
- ANDERSEN, M.; PANOSETTI, C.; REUTER, K. A Practical Guide to Surface Kinetic Monte Carlo Simulations. **Frontiers In Chemistry**, [S.L.], v. 7, p. 1-24, 9 abr. 2019.
- ANEEL - AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Nota Técnica Nº 22**. Brasília, 29 jan. 2015.
- ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Preço. 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrencia/precos>. Acesso em: 16 dez. 2023.
- ARBACHE, A. P. R. B.; GUARANY, G. P. B. **Responsabilidade social e diversidade**. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2021.

ASSIS, A. C. **Análise econômico - financeira**: estudo de caso em uma empresa agropecuária. Artigo científico (Pós-Graduação “Lato Sensu” em Gestão Financeira) – Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia. 8 p. 2010.

ASSIS, J. P. D.; DOURADO NETO, D.; NASS, L. L.; MANFRON, P. A.; BONNECARRÈRE, R. A. G.; MARTIN, T. N. (2006). Simulação estocástica de atributos do clima e da produtividade potencial de milho utilizando-se distribuição triangular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. v.41, n.3, p.539-543, mar. 2006.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de juros básicas – Histórico**. 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 09 jan. 2024.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic**. 2023. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 12 dez. 2023.

BERNARDES, M.; MORAES, F. T. F.; TANAKA, K. H.; LIMA, R. S. Engaging the End User in Waste from Electrical and Electronic Equipment Management: an action research study. **Systemic Practice And Action Research**, 1 maio 2023.

BERNARDI, P. B. **Análise de risco em investimentos imobiliários por simulação**. Florianópolis, 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

BERNARDO, M.; FOREHEAD, H.; VALLIN, I. C.; DIAS, S. L. F. G. Management of Household Plastic Waste in Wollongong, Australia: the role of selective waste collection systems. **Sustainability**, v. 15, n. 2, p. 1726, 16 jan. 2023.

BERNARDO, M.; LIMA, R. S. Planejamento e implantação de um programa de coleta seletiva: utilização de um sistema de informação geográfica na elaboração das rotas. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 9, n. 1, p. 385-395, out. 2017.

BEZERRA, A. S.; FREITAS, L. S. A Logística Reversa E O Triple Bottom Line Da Sustentabilidade. **Anais Do Congresso Brasileiro De Gestão Ambiental E Sustentabilidade**, 2017, João Pessoa. João Pessoa: Congestas, 2017. 5 v.

B3. **Taxa média de crescimento**. 2023. Disponível em: <https://bvmf.bmfbovespa.com.br/indices/ResumoTaxaMediaCrescimento.aspx?Indice=IBOV&iidioma=pt-br>. Acesso em: 09 jan. 2024.

BRASIL. **Decreto Nº. 3.000**, de 26 de março de 1999. Regulamenta a tributação, fiscalização, arrecadação e administração do Imposto de Renda e Proventos de Qualquer Natureza. Brasília/DF, 1999.

BRASIL. Presidência da República Casa Civil. **LEI Nº 11.196**, de 21 de novembro de 2005. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/lei/111196.htm. Acesso em: 15 maio 2023.

BRASIL. Presidência da República Casa Civil. **LEI Nº 12305**. Brasil, 2 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 12 jun. 2022.

BRASIL. Secretaria da Receita Federal do Brasil. **Instrução normativa RFB nº 1700**, de 14 de março de 2017. Disponível em: <http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?idAto=81268>. Acesso em: 12 set. 2022.

BRASIL. Diário Oficial da União. **Decreto Nº 10240**, 12 fev. 2020. Disponível em: www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.240-de-12-de-fevereiro-de-2020-243058096. Acesso em: 12 jun. 2022.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN, F. **Princípios das Finanças Corporativas**. 10. ed. Maidenhead, England: McGraw Hill Higher Education, 2010.

BOUNDY, T. How much material can a recycling facility source? A business-incentive based model for secondary material sourcing applied to waste LCD screen material. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 152, 2020.

CAMPOS, T. **Logística reversa: aplicação ao problema das embalagens da CEAGESP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. São Paulo. 2016

CANCELLI, D. M.; DIAS, N. L. Brevê: uma metodologia objetiva de cálculo de emissões para a frota brasileira de veículos. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, [S.L.], v. 19, p. 13-20, 2014.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H.. **Análise de Investimentos**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 458 p.

CASTRO, F. D.; MEHNER, E.; CUTAIA, L.; VACCARI, M. Life cycle assessment of an innovative lithium-ion battery recycling route: a feasibility study. **Journal Of Cleaner Production**, v. 368, p. 133130, set. 2022.

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem. **CEMPRE Review 2019: Um panorama da reciclagem no Brasil**. 2019. Disponível em: <https://cempre.org.br/cempre-review/>. Acesso em: 04 dez. 2023.

CHOI, J. K.; FTHENAKIS, V. Design and Optimization of Photovoltaics Recycling Infrastructure. **Environmental Science & Technology**, [S.L.], v. 44, n. 22, p. 8678-8683, 1 out. 2010.

CLEMENTE, S.; SOUZA, A. **Decisões financeiras e análises de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

COZZA, G.; D'ADAMO, I.; ROSA, P. Circular manufacturing ecosystems: automotive printed circuit boards recycling as an enabler of the economic development. **Production & Manufacturing Research**, v. 11, n. 1, p. 1-24, 2 mar. 2023.

COLE, C.; GNANAPRAGASAM, A.; SINGH, J.; COOPER, T. Enhancing Reuse and Resource Recovery of Electrical and Electronic Equipment with Reverse Logistics to Meet Carbon Reduction Targets. **Procedia Cirp**, [S.L.], v. 69, p. 980-985, 2018.

CORREIA NETO, J. F. **Elaboração e Avaliação de Projetos de Investimento**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 266 p.

COSTA, R. F. S. **Abordagem sistemática para avaliação econômica de cenários para modelos de simulação discreta em manufatura**. 2010. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, Itajubá, 2010.

CUCCHIELLA, F.; D'ADAMO, I.; ROSA, P.; TERZI, S. Automotive printed circuit boards recycling: an economic analysis. **Journal Of Cleaner Production**, v. 121, p. 130-141, maio 2016.

CUNHA, F. G.; LIMA, R. S. Systematic literature review on reverse logistics of waste electrical and electronic equipment: recommendations and opportunities for future research. *In: International Joint Conference On Industrial Engineering And Operations Management Proceedings*, 29, p. 1-13, 17 jul. 2023. Portugal.

CUNHA, F.G.; ESTEVES, T. D.; LIMA, R. S.; PINHO, A. F. Logística Reversa De Resíduos De Equipamentos Eletroeletrônicos - Um Estudo De Caso No Sul De Minas Gerais. *In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção*, 43, p. 1-15, 16 a 19 out. 2023. Fortaleza.

D'ADAMO, I.; FERELLA, F.; GASTALDI, M.; IPPOLITO, N. M.; ROSA, P. Circular solar: evaluating the profitability of a photovoltaic panel recycling plant. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, [S.L.], v. 41, n. 6, p. 1144-1154, 26 jan. 2023.

D'ADAMO, I.; FERELLA, F.; GASTALDI, M.; MAGGIORE, F.; ROSA, P.; TERZI, S. Towards sustainable recycling processes: wasted printed circuit boards as a source of economic opportunities. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 149, p. 455-467, out. 2019.

DAMODARAN, A. **Betas by Sector (US)**. 2023. Disponível em: https://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html. Acesso em: 04 jun. 2023.

DAMODARAN, A. **Avaliação de investimentos: ferramentas e técnicas para a determinação do valor de qualquer ativo**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1999.

DASSI, J. A.; ZANIN, A.; BAGATINI, F. M.; TIBOLA, A.; BARICHELLO, R.; MOURA, G. D. Análise da viabilidade econômico-financeira da energia solar fotovoltaica em uma Instituição de Ensino Superior do Sul do Brasil. **XXII Congresso Brasileiro de Custos** –, Foz do Iguaçu, n. 22, p. 1-16, dez. 2015.

DENG, S.; XIAO, Z.; ZHANG, W.; NOBLE, A.; DAS, S.; YIH, Y.; SUTHERLAND, J. W. Economic analysis of precious metal recovery from electronic waste through gas-assisted microflow extraction. **Resources, Conservation And Recycling**, [S.L.], v. 190, p. 106810, mar. 2023.

DENYER, D.; TRANFIELD, D. Denyer-Tranfield-Producing-a-Systematic-Review. Em: **The Sage Handbook of Organizational Research Methods**. Sage Publications ed. Thousand Oaks, CA. p. 671–689, 2009.

DIAS, P.; PALOMERO, J.; CENCI, M. P.; SCARAZZATO, T.; BERNARDES, A. M. Electronic waste in Brazil: generation, collection, recycling and the covid pandemic. **Cleaner Waste Systems**, v. 3, p. 100022, dez. 2022.

DIAS, P.; MACHADO, A.; HUDA, N.; BERNARDES, A. M. Waste electric and electronic equipment (WEEE) management: a study on the Brazilian recycling routes. **Journal Of Cleaner Production**, v. 174, p. 7-16, fev. 2018.

DUTTA, D.; RAUTELA, R.; GUJJALA, L. K. S.; KUNDU, D.; SHARMA, P.; TEMBHARE, M.; KUMAR, S. A review on recovery processes of metals from E-waste: a green perspective. **Science Of The Total Environment**, v. 859, p. 160391, fev. 2023.

EGLE - Department of Environment, Great Lakes, and Energy. **Electronic Waste Take Back Program**. Disponível em: <https://www.michigan.gov/egle/about/organization/materials-management/ewaste/takeback-program>. Acesso em: 02 nov. 2022.

ELLEN MCARTHUR FOUNDATION. **O que é a economia circular?** 2023. Disponível em: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/pt/temas/economia-circular-introducao/visao-geral>. Acesso em: 30 out. 2023.

EUROPEAN UNION. **Directive 2011/61/Eu**. Of The European Parliament And Of The Council of 8 June 2011. On the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment. L 174 European Union Official Journal of the European Union, 1 jul. 2011.

EUROPEAN UNION. **Directive 2012/18/Eu**. Of The European Parliament and of the Council, of 4 July 2012. The control of major-accident hazards involving dangerous substances, amending and subsequently repealing Council Directive 96/82/EC. L 197 European Union Official Journal of the European Union, 24 jul. 2012.

FARGNOLI, M.; MINICIS, M.; TRONCI, M. Design Management for Sustainability: an integrated approach for the development of sustainable products. **Journal Of Engineering And Technology Management**, v. 34, p. 29-45, out. 2014.

FELIPE, L. M.; LEISMANN, E. L. ANÁLISE DE VIABILIDADE EM PROJETOS: comparação entre os métodos determinísticos e probabilísticos. **Revista de Ciências Empresariais da Unipar**, v. 20, n. 1, p. 83-106, 3 out. 2019.

FENG, D.; YU, X.; MAO, Y.; DING, Y.; ZHANG, Y.; PAN, Z. Pricing Decision for Reverse Logistics System under Cross-Competitive Take-Back Mode Based on Game Theory. **Sustainability**, v. 11, n. 24, p. 6984, 6 dez. 2019.

FERREIRA, J. M. B.; FERREIRA, A. C. **A sociedade da informação e o desafio da sucata eletrônica**. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia. Vol. III, nº 3, P. 157-170, 2008.

FERREIRA, R. G. **Engenharia econômica e avaliação de projetos de investimento: critérios de avaliação: financiamentos e benefícios fiscais: análise de sensibilidade e risco**. 1ª ed. São Paulo: Atlas, 2009.

FEU, H. P. **Desenvolvimento De Workflow Para Implementação Dos Princípios De Boas Práticas De Laboratório**. 2015. 123 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Biotecnologia, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia - Inmetro, Duque de Caxias, 2015.

FIPS PUBS - Federal Information Processing Standards Publications. Integration definition for function modeling (IDEF0). **National Institute of Standards and Technology**, Computer Systems Laboratory, Gaithersburg, n. 183, 1993.

FORTI, V.; BALDE, C. P.; KUEHR, R.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows, and the circular economy potential**. United Nations University (UNU)/United Nations Institute for Training and Research (UNITAR) – co-hosted SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam. 2020, p.1-120.

GENNARO, C. K.; CORREA, M. S.; CORREA, M. S.; OLIVEIRA, M. C.; OLIVEIRA, M. C.; HELLENO, A. L.; HELLENO, A. L. Aplicação da Simulação de Eventos Discretos para propostas de melhorias numa linha de montagem de uma empresa do setor automotivo. **Exacta**, v. 15, n. 1, p. 47-56, 27 mar. 2017.

GIL, A. CARLOS. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. Atlas, 2008.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira**. 12.ed. São Paulo: Pearson, 2010.

GIMENES, A. A.; FRANCISCO, D. F.; SILVA, E. T. G. **Fluxo de Caixa**. III Encontro Científico e Simpósio de Educação Unisalesiano - Educação e Pesquisa: a produção do conhecimento e a formação de pesquisadores. Lins, 2011. p 10.

GONÇALVES, G.; ABRAHÃO, R.; ROTELLA JUNIOR, P.; ROCHA, L. Economic Feasibility of Conventional and Building-Integrated Photovoltaics Implementation in Brazil. **Energies**, v. 15, n. 18, p. 6707, 14 set. 2022.

GOUVEIA, N.; BUZZO, M. L.; GROSSI, M. G. L.; SOUZA, G. F.; MUTO, E. Y. Exposição ocupacional ao mercúrio em cooperativas de triagem de materiais recicláveis da região metropolitana de São Paulo, SP, Brasil. **Ciência & Saúde Coletiva**, v. 24, n. 4, p. 1517-1526, abr. 2019.

GUARNIERI, P.; E SILVA, L. C.; LEVINO, N. A. Analysis of electronic waste reverse logistics decisions using Strategic Options Development Analysis methodology: A Brazilian case. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 1105–1117, 2016

HALAWA, W. S.; ABDELALIM, A. M. K.; ELRASHED, I. A. Financial evaluation program for construction projects at the pre-investment phase in developing countries: A case study. **International Journal of Project Management**, v. 31, Issue 6, p. 912-923, 2013.

HERAT, S.; AGAMUTHU, P. E-waste: a problem or an opportunity? review of issues, challenges and solutions in asian countries. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, v. 30, n. 11, p. 1113-1129, 30 jul. 2012.

HISCHIER, R.; BÖNI, H. W. Combining environmental and economic factors to evaluate the reuse of electrical and electronic equipment – a Swiss case study. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 166, p. 105307, mar. 2021.

HUGO, A. A.; LIMA, R. S. Healthcare waste management assessment: challenges for hospitals in covid-19 pandemic times. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 39, n. 1, p. 56-63, 12 abr. 2021.

HUISMAN, J.; LEROY, P.; TERTRE, F.; SÖDERMAN, M. L.; CHANCEREL, P.; CASSARD, D.; LØVIK, A. N.; WÄGER, P.; KUSHNIR, D.; ROTTER, V. S. **Prospecting Secondary Raw Materials in the Urban Mine and mining wastes (ProSUM)** - Final Report. Isbn: 978-92-808-9060-0 (Print), 978-92-808-9061-7 (Electronic), Brussels, p. 1-49, dez. 2017.

JAPAN. **Law for the Promotion of Effective Utilization of Resources**, April 2001. This Law aims at establishing a sound material-cycle economic system. abr. 2001a.

JAPAN. **Law for the Recycling of Specified Kinds of Home Appliances**, April 2001. Aiming to realize sound waste treatment and efficient use of resources through reduction of waste and full utilization of recyclable resources for the realization of a sound material-cycle society. abr. 2001b.

JAYASIRI, G.; HERAT, S.; KAPARAJU, P. Management of Small WEEE: future directions for australia. **Sustainability**, v. 15, n. 18, p. 13543, 11 set. 2023.

JEON, S. M.; KIM, G. A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). **Production Planning and Control**. v. 27, p. 360-377, 3 abr. 2016.

KAUARK, F. S.; MANHÃES, F. C.; MEDEIROS, C. H. **Metodologia da pesquisa: um guia prático**. 1a ed. Itabuna: Via Litterarum, 2010.

KILIC, H. S.; CEBECI, U.; AYHAN, M. B. Reverse logistics system design for the waste of electrical and electronic equipment (WEEE) in Turkey. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 95, p. 120–132, 2015.

KOSHTA, N.; PATRA, S.; SINGH, S. P. Sharing economic responsibility: Assessing end user's willingness to support E-waste reverse logistics for circular economy. **Journal of Cleaner Production**, v. 332, 2022.

KOSHTA, N.; PATRA, S.; SINGH, S. P. Estimation of E-waste at micro level for reverse logistics: a case of delhi. **Journal Of Cleaner Production**, v. 314, p. 128063, set. 2021.

KUMAR, D.; LONG, S. P.; ARORA, A.; SINGH, V. Techno-economic feasibility analysis of engineered energycane-based biorefinery co-producing biodiesel and ethanol. **Gcb Bioenergy**, v. 13, n. 9, p. 1498-1514, jul. 2021.

LABUSCHAGNE C.; BRENT A. C.; CLAASEN S. J. Environmental and social impact considerations for sustainable project life cycle management in the process industry. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, Malden, v. 12, p. 38–54, 2005.

LAWEEEDA. **Projeto LaWEEEda**. 2019. Disponível em: <https://www.youtube.com/@projetolaweeda7582>. Acesso em: 11 dez. 2023.

LEAL, F. **Análise do efeito interativo de falhas em processos de manufatura através de projeto de experimentos simulados**. 2008, p. 238. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, SP.

- LEAO, L. **O que é o Ibovespa? Saiba como o índice funciona e qual o impacto na sua vida.** 2023. <https://investidor.estadao.com.br/educacao-financeira/o-que-e-o-ibovespa-saiba-como-o-indice-funciona-e-qual-o-impacto-na-sua-vida/>. Acesso em: 09 jan. 2024.
- LEITE, P. R. **Logística Reversa: Sustentabilidade e Competitividade.** 3. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.
- LEMES JUNIOR, A. B.; CHEROBIM, A. P.; RIGO, C. M. **Administração Financeira: princípios, fundamentos e práticas brasileiras.** 5 reimpressões. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.
- LEUANGTHONG, O.; KHAN, K. D.; DEUTSCH, C.V. **Solved problems in geostatistics.** Hoboken, John Wiley & Sons. 2008. 208p.
- Li, J.; LIU F. Economic analysis of recovery Mode for waste household electric appliances based on government incentives. *In: International Conference on Computer Engineering and Technology*, 2.,2010. Tianjin. V6-346. **Proceedings...** School of Management Tianjin University of Technology, 2010.
- LIGO, Alexandre Kimiyaki. **A Simulação de Monte Carlo como Instrumento de Análise de Riscos e Seleção de Projetos.** 2003. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Finanças, Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2003.
- MACEDO, C. A. A.; ALBUQUERQUE, A. A.; MORALLES, H. F. Análise de viabilidade econômico-financeira de um projeto eólico com simulação Monte Carlo e avaliação de risco. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 4, p. 731-744, 11 dez. 2017.
- MAGRINI, C.; JAGODZIŃSKA, K. Can bioleaching of NIB magnets be an answer to the criticality of rare earths? An ex-ante Life Cycle Assessment and Material Flow Cost Accounting. **Journal Of Cleaner Production**, v. 365, p. 132672, set. 2022.
- MAHESWARI, H.; YUDOKO, G.; ADHIUTAMA, A. Theory building of quattro bottom line approach for sustainable reverse logistics from government perspective: The Indonesia evidence. **Advances in Science, Technology and Engineering Systems**, v. 3, n. 4, p. 83–98, 2018.
- MAHESWARI, H.; YUDOKO, G.; ADHIUTAMA, A.; AGUSTINA, H. Sustainable reverse logistics scorecards for the performance measurement of informal e-waste businesses. **Heliyon**, v. 6, n. 9, p. 04834, set. 2020.
- MAIRIZAL, A. Q.; SEMBADA, A. Y.; TSE, K. M.; HAQUE, N.; RHAMDHANI, M. A. Techno-economic analysis of waste PCB recycling in Australia. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 190, p. 106784, mar. 2023.
- MARION, J. C. **Contabilidade empresarial.** 10. Ed. São Paulo: Atlas, 2003.
- MARTINS, R. A; SOUSA, R; COSTA, S. E. G; PUREZA V. **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações:** Elsevier: ABEPRO, 2012.
- MAYER, R. J.; PAINTER, M. K.; WITTE, P. S. – IDEF Family of Methods for Concurrent Engineering and Business Re-engineering Applications. **Knowledge-Based Systems.** p. 1-77. 1992.

MELO, M. S. M. **Energia eólica: aspectos técnicos e econômicos**. 2012. 154 p. (Dissertação de mestrado). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-graduação e Pesquisa de Engenharia – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

MELO, S. T. L. P. **Sociedade Empresária Limitada E Sociedade Anônima Fechada: análise comparativa fulcrada no risco de alcance do patrimônio pessoal do sócio**. 2014. 264 p. (Tese de doutorado). Programa de Pós-Graduação em Direito, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2011). **Primeiro inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários: relatório final**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf>. Acesso em: 13 dez 2023.

MITROFF, I. I.; BETZ, F.; PONDY, L. R., SAGASTI, F. On Managing Science in the Systems Age: Two Schemas for the Study of Science as a Whole Systems Phenomenon. **Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 46–58, 1974.

MONTEVECHI, J. A. B.; LEAL, F.; PINHO, A. F.; COSTA, R. F. S.; OLIVEIRA, M. L. M.; SILVA, A. L. F. Conceptual modeling in simulation projects by mean adapted IDEF: an application in a brazilian tech company. **Proceedings Of The 2010 Winter Simulation Conference**, p. 1-13, dez. 2010.

NARDI, P. C. C. **Logística reversa: proposta de um modelo para acompanhamento da sustentabilidade de um processo produtivo de Ref. PET**. 2013. Tese (Doutorado em Administração de Organizações) - Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2013.

NETO, R. M.; PUREZA, V. Modelagem e Simulação. CAUCHICK, P. A. M; FLEURY, A; MELLO, C. H. P; NAKANO, D. N; LIMA, E. P; TURRIONI, J. B; HO, L. L; MORABITO, R; MARTINS, R. A; SOUSA, R; COSTA, S. E. G; PUREZA V. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações: Elsevier: ABEPRO, 2012.

OLIVEIRA, M. L. M. **Análise Da Aplicabilidade Da Técnica De Modelagem Idef-Sim Nas Etapas De Um Projeto De Simulação A Eventos Discretos**. 2010. 168 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Engenharia de Produção, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

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, 2020.

OTTONI, M.; CUGULA, J.; FREITAS, E. S. C.; XAVIER, L. H. Estimativa De Emissões De Co2 E Custos Na Logística Reversa De Resíduos Eletroeletrônicos No Estado Do Rio De Janeiro. *In: Fórum Internacional de Resíduos Sólidos* 12, 2021. São Paulo.

PARAJULY, K.; KUEHR, R.; AWASTHI, A. K.; FITZPATRICK, C.; LEPAWSKY, J.; SMITH E.; WIDMER, R.; ZENG, X. **Future e-waste scenarios**. STEP (Bonn), Unu Vie-Scycle (Bonn) & Unep Ietc (Osaka), Osaka, p. 3-19, 2019.

- REINHART, L.; VRUCAK, D.; WOESTE, R.; LUCAS, H.; ROMBACH, E.; FRIEDRICH, B.; LETMATHE, P. Pyrometallurgical recycling of different lithium-ion battery cell systems: economic and technical analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 416, p. 137834, set. 2023.
- PEIRÓ, L. T.; GIRÓN, A. C.; DURANY, X. G. I. Examining the feasibility of the urban mining of hard disk drives. **Journal Of Cleaner Production**, v. 248, p. 119216, mar. 2020.
- PEREIRA, T. F., MONTEVECHI, J. A. B., MIRANDA, R.C. Identificação dos principais métodos de pesquisa utilizados em projetos de simulação. IN: **Simpósio De Engenharia De Produção**, 2013.
- PEREIRA, T. F.; MONTEVECHI, J. A. B.; ROCHA, G. V.; OLIVEIRA, M. L M.; OLIVEIRA, M. S. Análise multivariada de um framework para gerenciamento de projetos de Simulação a Eventos Discretos em uma empresa de tecnologia. In: L **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2018.
- PEREIRA, F. I.; OLIVEIRA, F. T. Modelagem do Custeio Baseado em Atividade e Tempo (TDABC) em uma Empresa Prestadora de Serviços de Reciclagem de Plásticos. **XXIII Congresso Brasileiro de Custos**, Porto de Galinhas, p. 1-18, 16 nov. 2016.
- PETERNELLI, L. A.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G. Uma Proposta Para A Geração De Amostras Aleatórias Nos Problemas De Simulação Em Modelos De Planejamento. **Sociedade de Investigações Florestais**. v.30, n.5, p.749-758, 2006.
- PINTO, Isabelly Christiny Monteiro de Souza. **Análise Dos Riscos Presentes Nos Custos Da Construção Civil Pelo Método Monte Carlo**. 2017. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.
- POURHEJAZY, P.; ZHANG, D.; ZHU, Q.; WEI, F.; SONG, S. Integrated E-waste transportation using capacitated general routing problem with time-window. **Transportation Research Part e: Logistics and Transportation Review**, v. 145, p. 102169, jan. 2021.
- RICHA, K.; BABBITT, C. W.; GAUSTAD, G. Eco-Efficiency Analysis of a Lithium-Ion Battery Waste Hierarchy Inspired by Circular Economy. **Journal Of Industrial Ecology**, v. 21, n. 3, p. 715-730, 15 maio 2017.
- RYTER, J.; FU, X.; BHUWALKA, K.; ROTH, R.; OLIVETTI, E. Assessing recycling, displacement, and environmental impacts using an economics-informed material system model. **Journal Of Industrial Ecology**, v. 26, n. 3, p. 1010-1024, 15 fev. 2022.
- ROCHA, T. B.; PENTEADO, C. S. G. Life cycle assessment of a small WEEE reverse logistics system: Case study in the Campinas Area, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, 2021.
- RODRIGUES, E. M.; NUNES, V. R.; ADRIANO, N. A. A simulação de Monte Carlo como instrumento para a análise econômico-financeira em investimentos de risco - O caso de uma decisão de investimento na abertura de uma filial para revenda de equipamentos pesados no Estado do Ceará. In: XV Congresso Brasileiro de Custos, Belo Horizonte, 2010. **Anais...** Belo Horizonte: CBC, 2010.

ROGERS, D. S.; TIBBEN-LEMBKE, R. An Examination Of Reverse Logistics Practices. **Journal of Business Logistics**, v. 22, n. 2, p. 129–148, 2001.

ROTHER, M; SHOOK, J. **Aprendendo a enxergar**: Tradução de Lean Institute. Brasil. São Paulo: Lean Institute Brasil, 2003

SA, K. T. **O Uso Do Software Crystal Ball No Orçamento Empresarial: Projeção E Análise Do Faturamento**. 2017. 53 f. Monografia (Especialização) - Curso de Ciências Atuariais, Faculdade de Economia, Administração, Atuária e Contabilidade, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SALES, I. J. S.; AMORIM, P. L. L.; SOUZA, R. G. Multi-criteria analysis of the feasibility of e-waste pre-treatment units in a Brazilian city. **Environment Systems And Decisions**, p. 1-12, 14 set. 2023.

SANTANA, J. V.; CONTI, D. M.; RIBEIRO, F. M.; FILHO SILVA, C. F. Petrochemical Sector Initiatives In Relation To The Circular Economy And Sustainability. **Latin American Journal of Business Management**, p. 177-187, jul-dez. 2022.

SANTOS, K. L.; JACOBI, P. R. Alignments between e-waste legislation and the Sustainable Development Goals: the united kingdom, brazil, and ghana case studies. **Geo: Geography and Environment**, v. 9, n. 1, p. 1-16, jan. 2022.

SANTOS, K. L. The recycling of e-waste in the Industrialised Global South: the case of Sao Paulo Macrometropolis. **International Journal of Urban Sustainable Development**, p. 1–14, 2020.

SANTOS, S. M.; OGUNSEITAN, O. A. E-waste management in Brazil: Challenges and opportunities of a reverse logistics model. **Environmental Technology and Innovation**, v. 28, 2022.

SARGENT, R. G. Verification and validation of simulation models. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, **Proceedings...** Austin, TX, USA, 2009.

SARKIS, J.; HELMS, M. M.; HERVANI, A. A. Reverse Logistics and Social Sustainability. **Corporate Social Responsibility and Environmental Management**, Malden, v.17, p. 337–354, 2010.

SCHEIDEGGER, A. P. G.; PEREIRA, T. F.; OLIVEIRA, M. L. M.; BANERJEE, A.; MONTEVECHI, J. A. B. An introductory guide for hybrid simulation modelers on the primary simulation methods in industrial engineering identified through a systematic review of the literature. **Computers & Industrial Engineering**, v. 124, p. 474-492, out. 2018.

SILVA, L. L. O. **Uso Da Técnica De Simulação De Monte Carlo Para A Previsão Da Vida Em Fadiga Sob Condições Multiaxiais**. 2017. 75 p. Monografia (Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

SILVA, A. K. **Método para avaliação e seleção de softwares de simulação de eventos discretos aplicados à análise de sistemas logísticos**. 2006. 212 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade de São Paulo, São Paulo. 2006.

SINIR. **Resíduos Domiciliares**. 2023. Disponível em: <https://sinir.gov.br/informacoes/tipos-de-residuos/residuos-domiciliares/>. Acesso em: 17 ago. 2023.

SOUSA, J. J. B.; CARVALHO, J. J.; NASCIMENTO, M. V. S. Análise da viabilidade econômica e financeira da produção de frangos região centro sul do estado do Piauí. **International Journal Of Scientific Management And Tourism**, v. 9, n. 5, p. 2693-2712, 6 set. 2023.

SOUZA, R. G.; CLÍMACO, J. C. N.; SANT'ANNA, A. P.; ROCHA, T. B.; VALLE, R. A. B.; QUELHAS, O. L. G. Sustainability assessment and prioritisation of e-waste management options in Brazil. **Waste Management**, v. 57, p. 46-56, nov. 2016.

SOUZA, A. B. **Projetos de Investimentos de Capital: Elaboração, Análise e Tomada de Decisão**. São Paulo: Atlas 2003.

STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTRÖM, J.; CORNELL, S. E.; FETZER, I.; BENNETT, E. M.; BIGGS, R.; CARPENTER, S. R.; VRIES, W.; WIT, C. A. de. Planetary boundaries: guiding human development on a changing planet. **Science**, v. 347, n. 6223, p. 1-12, 13 fev. 2015.

SUMARI, S.; IBRAHIM, R.; ZAKARIA, N. H.; HAMID, A. H. A. Comparing Three Simulation Model Using Taxonomy: system dynamic simulation, discrete event simulation and agent based simulation. **International Journal Of Management Excellence**, v. 1, n. 3, p. 54, 30 ago. 2013.

SUN, B.; LI, B.; MA, S.; ZHU, M.; DONG, C.; XIANG, M.; CHENG, H.; YU, Y. The recycling potential of unregulated waste electrical and electronic equipment in China: generation, economic value, and cost-benefit analysis. **Journal Of Cleaner Production**, v. 402, p. 136702, maio 2023.

TADIĆ, D. MIMOVIĆ, P. KOSTIĆ, J. ZAHAR ĐORĐEVIĆ, M. A fuzzy bi-linear management model in reverse logistic chains. **Yugoslav Journal of Operations Research**, v. 26, n. 1, p. 61–74, 2016.

TANSKANEN, P. Management and recycling of electronic waste. **Sciverse Sciencedirect**, Finland, p. 1001-1011, 2013.

TEMUR, G. T.; YANIK, S. A Novel Approach for Multi-Period Reverse Logistics Network Design under High Uncertainty. **International Journal of Computational Intelligence Systems**, v. 10, n. 1, p. 1168, 2017.

THOMPSON, D.; HYDE, C.; HARTLEY, J. M.; ABBOTT, A. P.; ANDERSON, P. A.; HARPER, G. D. J. To shred or not to shred: a comparative techno-economic assessment of lithium ion battery hydrometallurgical recycling retaining value and improving circularity in lib supply chains. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 175, p. 105741, dez. 2021.

TOMAZONI, T.; MENEZES, E. A. Estimativa do custo de capital de empresas brasileiras de capital fechado (sem comparáveis de capital aberto). **Revista de Administração**, v. 34, p. 38-48, 2002.

TONG, X.; WANG, J. Transnational Flows of E-Waste and Spatial Patterns of Recycling in China. **Eurasian Geography and Economics**. New York, v. 45, n. 8, p. 608–621, 2004.

TONG, X.; WANG, T.; CHEN, Y.; WANG, Y. Towards an inclusive circular economy: quantifying the spatial flows of e-waste through the informal sector in china. **Resources, Conservation And Recycling**, v. 135, p. 163-171, ago. 2018.

VALENTE, D. B.; GUABIROBA, R. C. S.; CONEJERO, M. A.; SILVA, M. A. V.; CÉSAR, A. S. Economic analysis of waste electrical and electronic equipment management: a study involving recycling cooperatives in brazil. **Environment, Development And Sustainability**, v. 23, n. 12, p. 17628-17649, 15 abr. 2021.

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

WELCH, I. The Consensus Estimate for the Equity Premium by Academic Financial Economists in December 2007. **Ssrn Electronic Journal**, p. 1-14, 2008.

WHITE, K. P.; INGALLS, R. G. The basics of simulation. **2017 Winter Simulation Conference (Wsc)**, p. 147-161, dez. 2017.

XU, X.; ZENG, X.; BOEZEN, H. M.; HUO, X.. E-waste environmental contamination and harm to public health in China. **Frontiers Of Medicine**, v. 9, n. 2, p. 220-228, 25 mar. 2015.

XAVIER, L.H., OTTONI, M. S.O., GOMES, C. F., ARAUJO, R.A., BICOV, N., NOGUEIRA, M., ESPINOSA, D.,TENÓRIO, J. **Guia de desmontagem de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. Rio de Janeiro: CETEM, 2020.

ZANIN, A; BAGATINI, F. M. The economic and financial feasibility of a biodigester: A sound alternative for reducing the environmental impact of swine production. In: CURKOVIC, S. (Org). **Sustainable Development – Authoritative and leading edge content for environmental management**. Rijeka, Croatia: Intech. P. 371-388, 2012.

ZENG, X.; MATHEWS, J. A.; LI, J. Urban Mining of E-Waste is Becoming More Cost-Effective Than Virgin Mining. **Environmental Science & Technology**, v. 52, n. 8, p. 4835-4841, 4 abr. 2018.

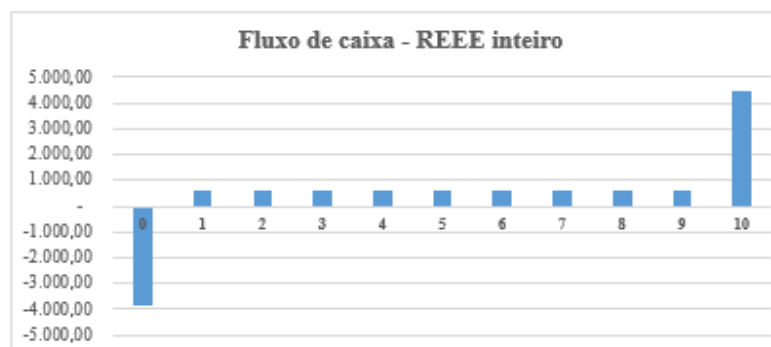
ZHAO, X.; BAI, X. How to motivate the producers' green innovation in WEEE recycling in China? – An analysis based on evolutionary game theory. **Waste Management**, v. 122, p. 26–35, 2021.

ZHOU, Y.-S.; WANG, S.-Y. Generic model of reverse logistics network design. **Jiaotong Yunshu Xitong Gongcheng Yu Xinxu/ Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology**, v. 8, n. 3, p. 71–78, 2008.

APÊNDICE A - Demonstração do Resultado de Exercício e Fluxo de Caixa nas situações RInt e RDesmont, respectivamente

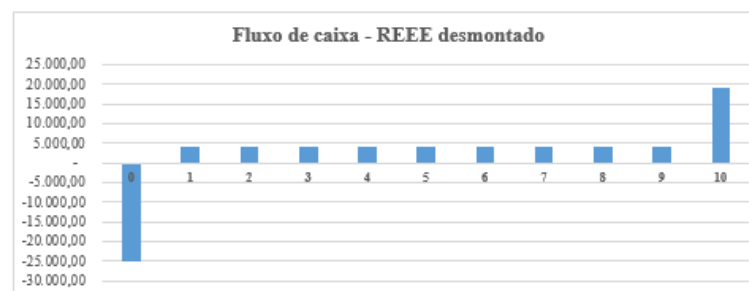
| DRE - DEMONSTRAÇÃO DO RESULTADO DE EXERCÍCIO (MODELO 1 - REEE INTEIRO) | | | | | | | | | | | | |
|--|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| Receita bruta | | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | 18.541,26 | |
| (-) Imposto | | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | 2.224,95 | |
| Receita líquida | | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | 16.316,31 | |
| (-) Custo | | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | 15.421,54 | |
| Lucro bruto | | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | |
| (-) Despesa | | | | | | | | | | | | |
| (-) Depreciação | | | | | | | | | | | | |
| Lucro antes de juros e imposto de renda | | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | |
| Despesas financeira (Juros) | | | | | | | | | | | | |
| Lucro antes dos tributos | | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | 894,77 | |
| (-) IRPJ/CSLL | | 304,22 | 304,22 | 304,22 | 304,22 | 304,22 | 304,22 | 304,22 | 304,22 | 304,22 | 304,22 | |
| Lucro líquido | | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | |
| (+) Depreciação | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | |
| (-) Amortização | | | | | | | | | | | | |
| (-) Investimento | | | | | | | | | | | | |
| (-) Capital de giro | 3.855,39 | | | | | | | | | | | |
| (+) Liberação do financiamento | | | | | | | | | | | | |
| (+) Valor residual | | | | | | | | | | | 3.855,39 | |
| Fluxo de caixa | - | 3.855,39 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 590,55 | 4.445,93 |

| | |
|------------|----------|
| TMA (WACC) | 15,32% |
| VPL | R\$ 0,00 |
| TIR | 15,32% |



| DRE - DEMONSTRAÇÃO DO RESULTADO DE EXERCÍCIO (MODELO 2 - REEE DESMONTADO) | | | | | | | | | | | | |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Ano | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | |
| Receita bruta | | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | 60.640,64 | |
| (-) Imposto | | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | 4.632,11 | |
| Receita líquida | - | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | 56.008,53 | |
| (-) Custo | | 50.244,40 | 50.073,94 | 50.073,94 | 50.244,40 | 50.073,94 | 50.073,94 | 50.244,40 | 50.073,94 | 50.073,94 | 50.244,40 | |
| Lucro bruto | - | 5.764,12 | 5.934,58 | 5.934,58 | 5.764,12 | 5.934,58 | 5.934,58 | 5.764,12 | 5.934,58 | 5.934,58 | 5.764,12 | |
| (-) Despesa | | | | | | | | | | | | |
| (-) Depreciação | | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.199,47 | 1.199,47 | 1.199,47 | 1.199,47 | 1.199,47 | |
| Lucro antes de juros e imposto de renda | - | 4.495,70 | 4.666,16 | 4.666,16 | 4.495,70 | 4.666,16 | 4.735,11 | 4.564,65 | 4.735,11 | 4.735,11 | 4.564,65 | |
| Despesas financeira (Juros) | | | | | | | | | | | | |
| Lucro antes dos tributos | - | 4.495,70 | 4.666,16 | 4.666,16 | 4.495,70 | 4.666,16 | 4.735,11 | 4.564,65 | 4.735,11 | 4.735,11 | 4.564,65 | |
| (-) IRPJ/CSLL | | 1.528,54 | 1.586,49 | 1.586,49 | 1.528,54 | 1.586,49 | 1.609,94 | 1.551,98 | 1.609,94 | 1.609,94 | 1.551,98 | |
| Lucro líquido | - | 2.967,16 | 3.079,67 | 3.079,67 | 2.967,16 | 3.079,67 | 3.125,17 | 3.012,67 | 3.125,17 | 3.125,17 | 3.012,67 | |
| (+) Depreciação | | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.268,42 | 1.199,47 | 1.199,47 | 1.199,47 | 1.199,47 | 1.199,47 | |
| (-) Amortização | | | | | | | | | | | | |
| (-) Investimento | 12.339,47 | | | | | | | | | | | |
| (-) Capital de giro | 12.561,10 | | | | | | | | | | | |
| (+) Liberação do financiamento | | | | | | | | | | | | |
| (+) Valor residual | | | | | | | | | | | 15.004,32 | |
| Fluxo de caixa | - | 24.900,57 | 4.235,59 | 4.348,09 | 4.348,09 | 4.235,59 | 4.348,09 | 4.324,64 | 4.212,14 | 4.324,64 | 4.324,64 | 19.216,46 |

| | |
|------------|----------|
| TMA (WACC) | 15,32% |
| VPL | R\$ 0,00 |
| TIR | 15,32% |

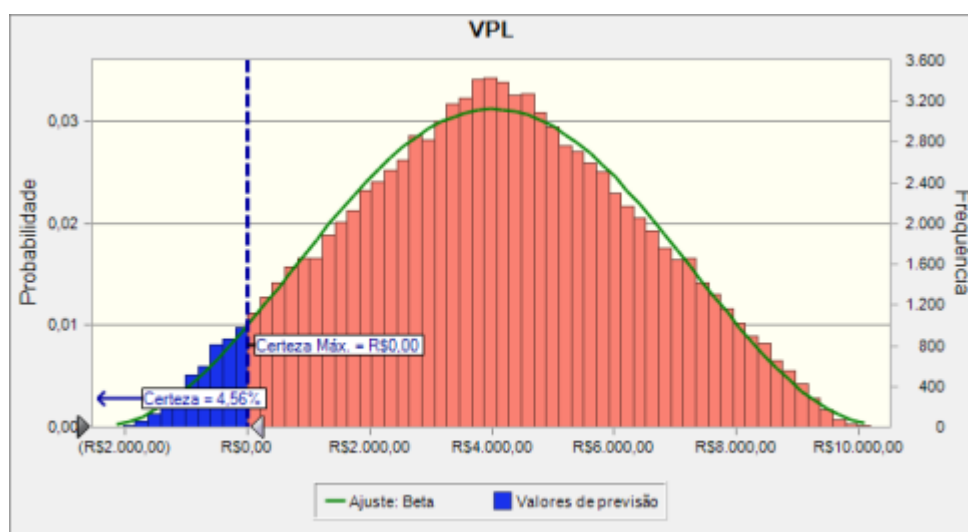


| | | | |
|-----------------------------|-----------|------------------------------|----------|
| Depreciação acumulada | 12.339,47 | Valor contábil no último ano | - |
| Resultado da venda do ativo | 3.701,84 | Tributos sobre venda ativo | 1.258,63 |

APÊNDICE B - Distribuições do VPL na situação RInt

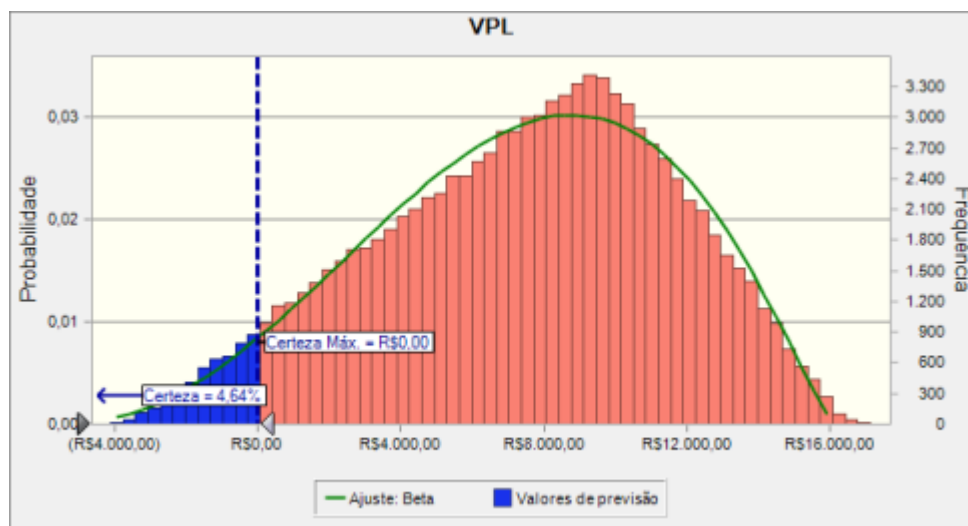
Para cada um dos nove cenários de ambas as situações, RInt e RDesmont, foram conduzidas Simulações de Monte Carlo (SMC) atribuindo valores a cada variável, conforme detalhado na seção 4.3 desta dissertação, para alimentar o fluxo de caixa incremental. Os valores dos VPL conseguidos das SMC de cada cenário na situação RInt são apresentados neste apêndice. No Gráfico 14 é exibido a distribuição dos VPL no cenário inicial. O resultado varia de -R\$ 2.239,14 a R\$ 10.187,47, com o valor mais provável sendo R\$ 4.009,61, e uma probabilidade de 4,56% do VPL ser negativo.

Gráfico 14 - VPL na situação RInt cenário inicial



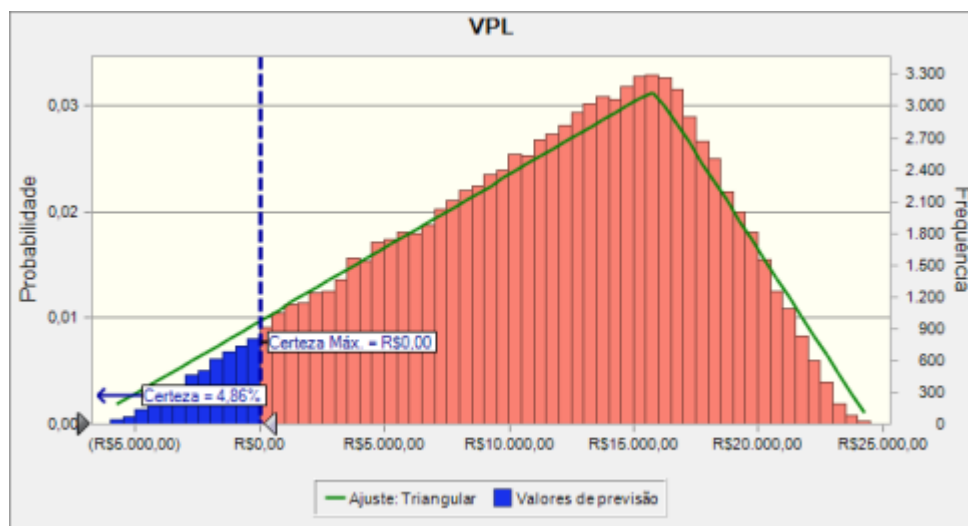
O Gráfico 15 representa a distribuição dos VPL para o cenário 1, onde o resultado varia entre -R\$ 4.432,33 e R\$ 17.103,89. O valor mais provável é R\$ 9.905,75, com uma probabilidade de 4,64% do VPL ser negativo.

Gráfico 15 - VPL na situação RInt cenário 1



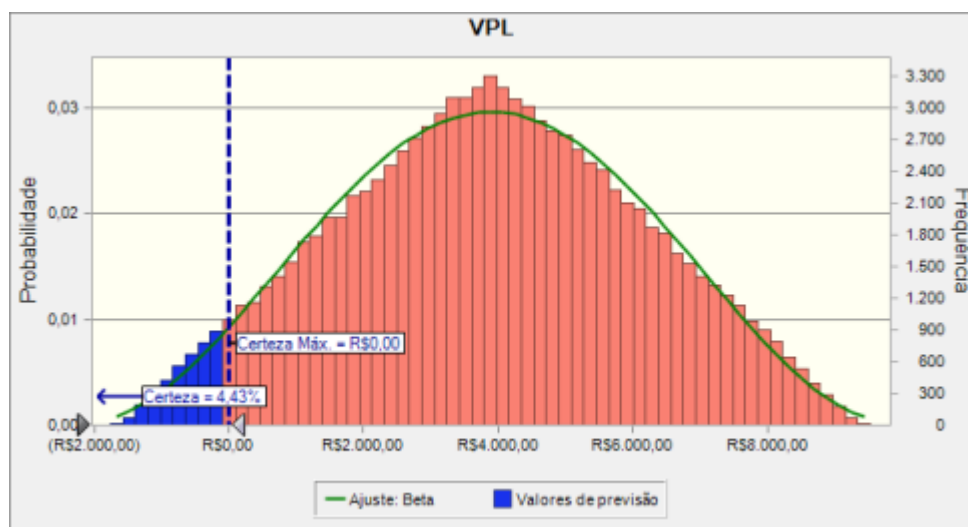
O Gráfico 16 exibe a distribuição dos VPL para o cenário 2, com o resultado variando entre -R\$ 7.015,68 e R\$ 24.478,17. O valor mais provável é R\$ 16.694,13, com uma probabilidade de 4,86% do VPL ser negativo.

Gráfico 16 - VPL na situação RInt cenário 2



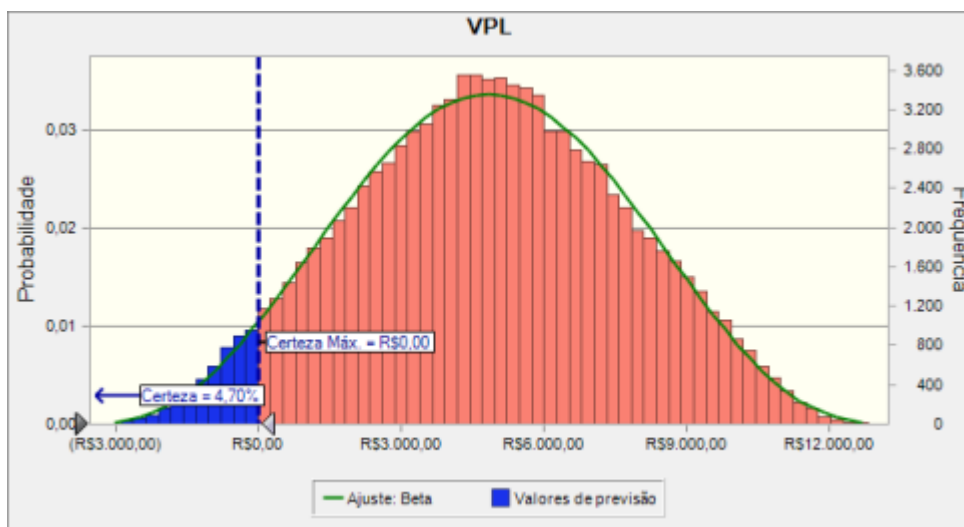
A distribuição dos VPL para o cenário 3 é apresentada no Gráfico 17 com o resultado variando de -R\$ 1.753,89 a R\$ 9.524,08. O valor mais provável é R\$ 3.872,68, com uma probabilidade de 4,43% do VPL ser negativo.

Gráfico 17 - VPL na situação RInt cenário 3



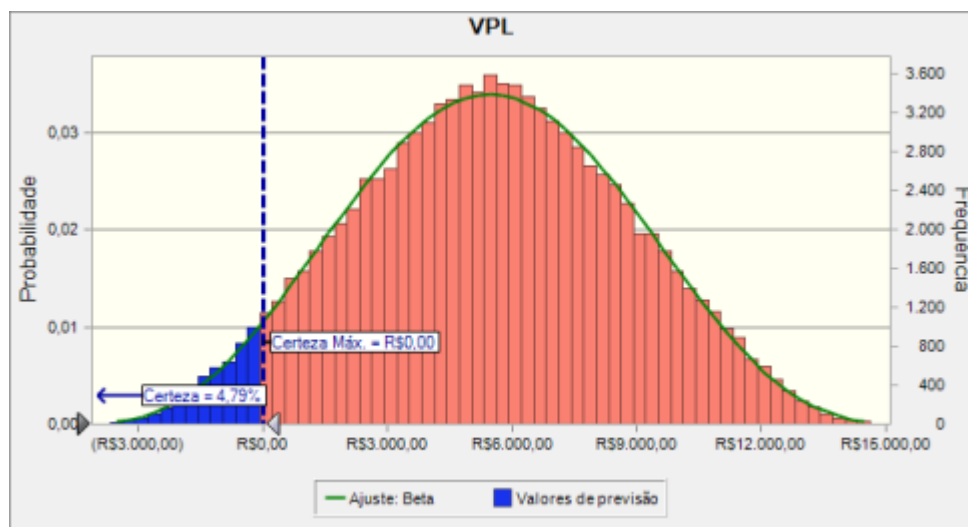
O Gráfico 18 exibe a distribuição dos VPL para o cenário 4, com o resultado variando entre -R\$ 3.853,18 e R\$ 13.051,89. O valor mais provável é R\$ 4.808,73, com uma probabilidade de 4,70% do VPL ser negativo.

Gráfico 18 - VPL na situação RInt cenário 4



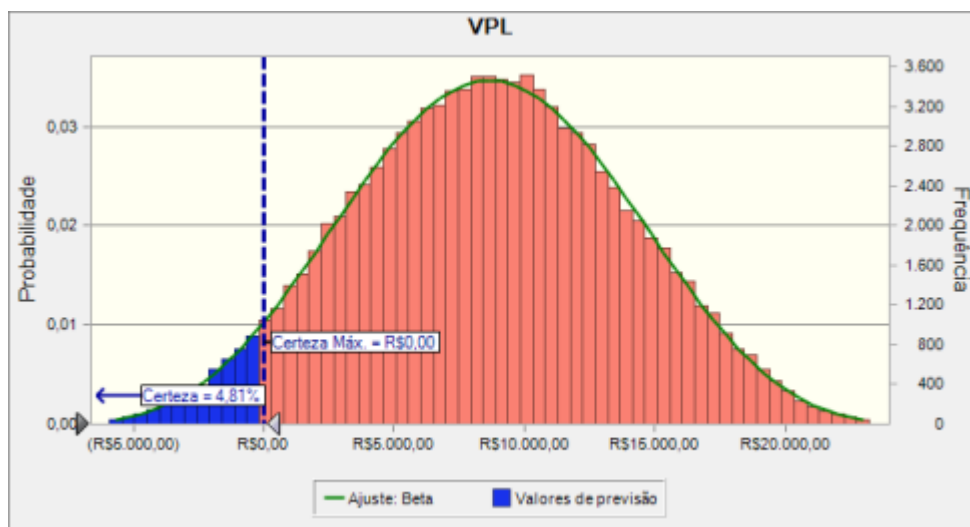
A distribuição dos VPL para o cenário 5 é apresentada no Gráfico 19, com o resultado variando de -R\$ 4.358,70 a R\$ 16.211,54. O valor mais provável é igual a R\$ 5.470,92, com uma probabilidade de 4,79% do VPL ser negativo.

Gráfico 19 - VPL na situação RInt cenário 5



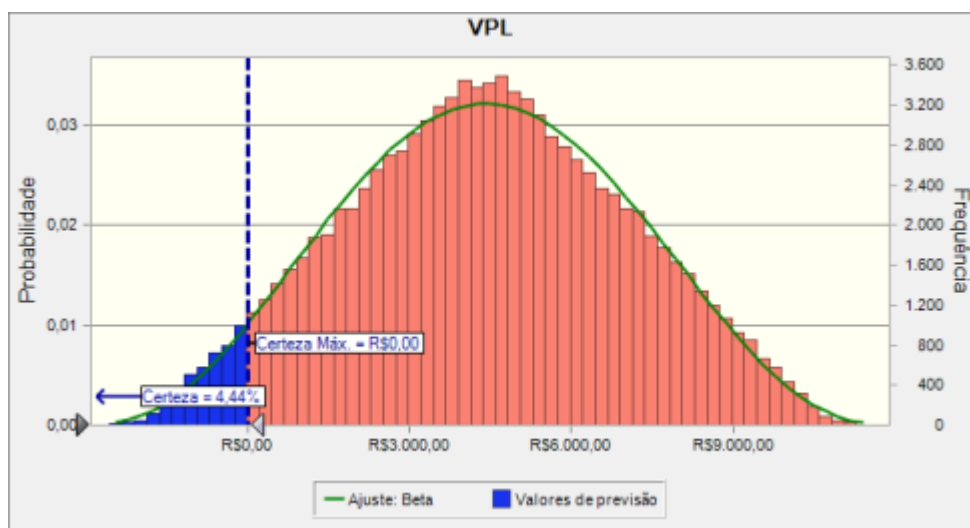
O Gráfico 20 mostra a distribuição dos VPL para o cenário 6, com o resultado variando entre -R\$ 9.639,49 e R\$ 27.073,36. O valor mais provável é R\$ 8.675,67, com uma probabilidade de 4,81% do VPL ser negativo.

Gráfico 20 - VPL na situação RInt cenário 6



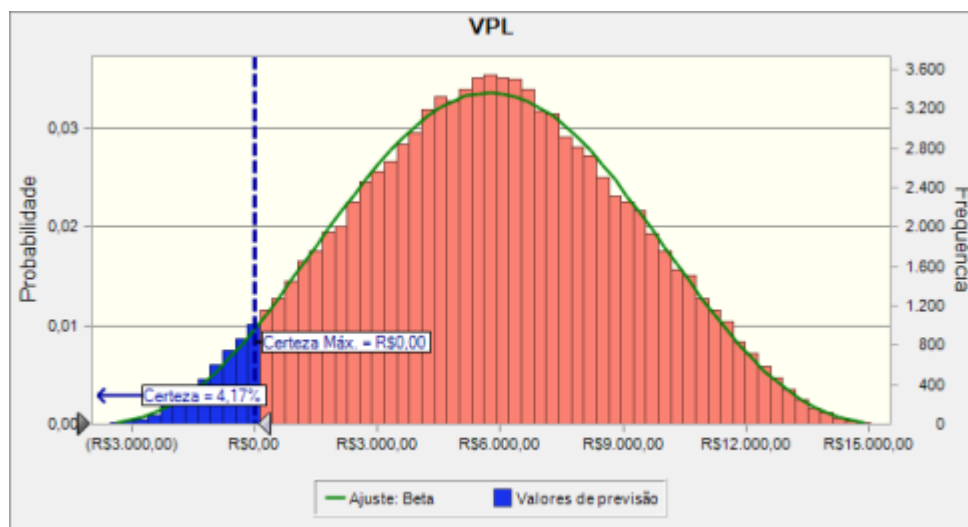
No Gráfico 21, a distribuição dos VPL para o cenário 7 é apresentada, com o resultado variando de -R\$ 2.554,80 a R\$ 11.518,47. O valor mais provável é R\$ 4.441,14, com uma probabilidade de 4,44% do VPL ser negativo.

Gráfico 21 - VPL na situação RInt cenário 7



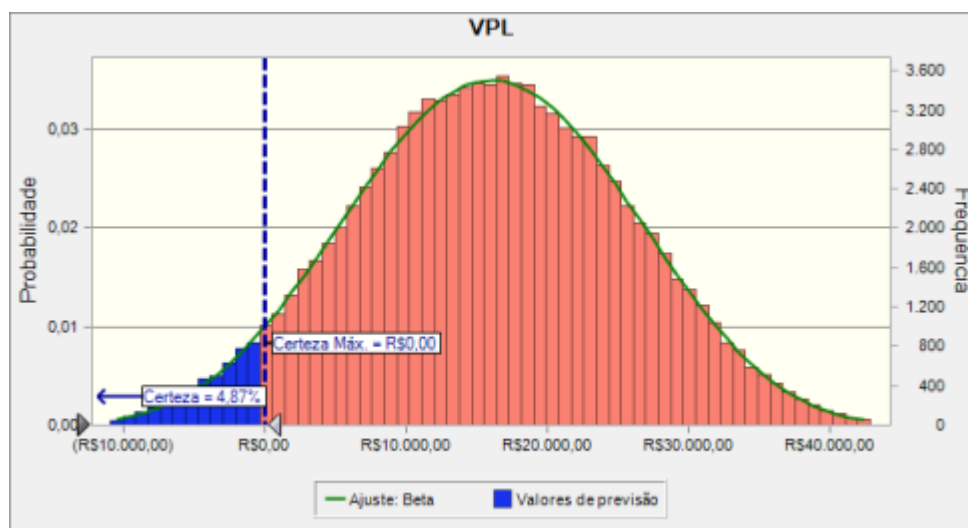
A distribuição dos VPL para o cenário 8 é exibida no Gráfico 22, com o resultado variando entre -R\$ 4.482,47 e R\$ 16.216,35. O valor mais provável é R\$ 5.746,55, com uma probabilidade de 4,17% do VPL ser negativo.

Gráfico 22 - VPL na situação RInt cenário 8



No Gráfico 23, mostra-se a distribuição dos VPL para o cenário 9, com o resultado variando de -R\$ 19.253,61 a R\$ 50.476,08. O valor mais provável é R\$ 15.939,38, com uma probabilidade de 4,87% do VPL ser negativo.

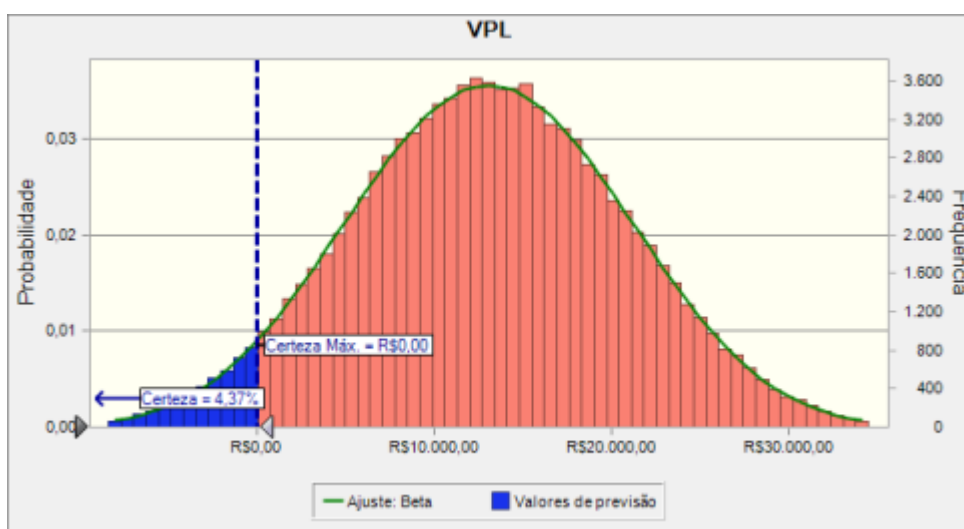
Gráfico 23 - VPL na situação RInt cenário 9



APÊNDICE C - Distribuições do VPL na situação RDesmont

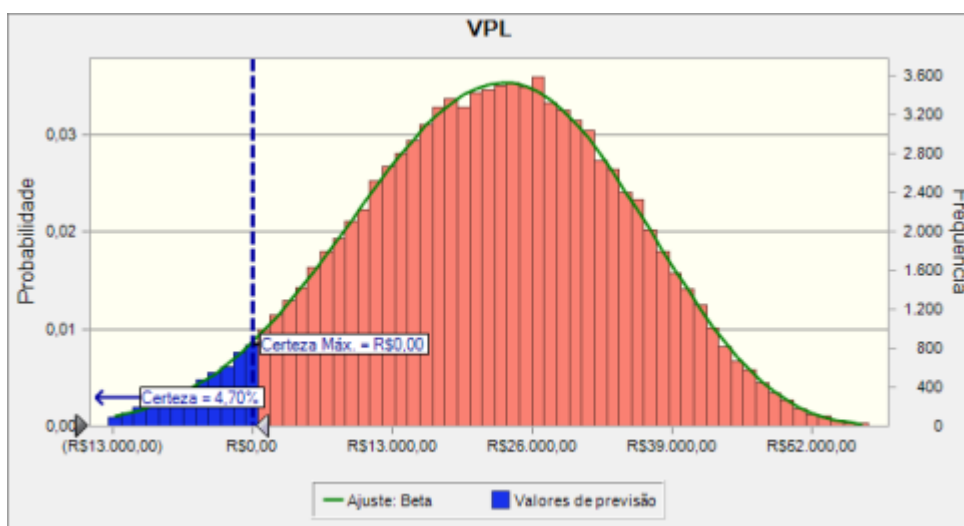
Em cada um dos nove cenários nas situações, RInt e RDesmont, foram executadas Simulações de Monte Carlo (SMC), com a atribuição de valores a cada variável, como detalhado na seção 4.3 deste estudo, para compor o fluxo de caixa incremental. Os resultados dos VPL obtidos provenientes das SMC de cada cenário na situação RDesmont estão apresentados neste apêndice. No Gráfico 24 é retratada a distribuição dos VPL no cenário inicial. O resultado varia de -R\$ 14.114,60 a R\$ 40.427,06, o valor mais provável é R\$ 13.043,74, com uma probabilidade de 4,37% do VPL ser negativo.

Gráfico 24 - VPL na situação RDesmont cenário inicial



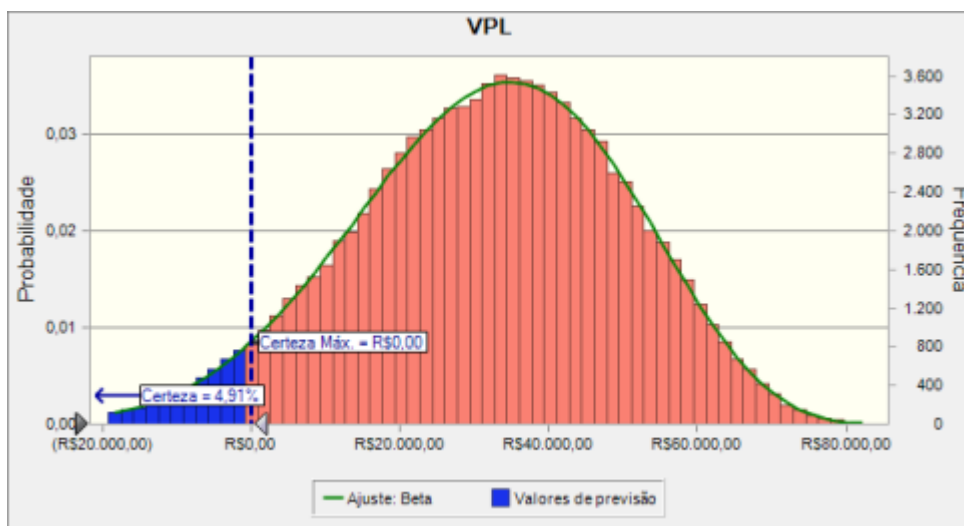
No Gráfico 25, são evidenciados os VPL para o cenário 1, com o resultado variando de -R\$ 26.541,03 a R\$61.591,94. O valor mais provável é R\$ 21.888,06, com uma probabilidade de 4,70% do VPL ser negativo.

Gráfico 25 - VPL na situação RDesmont cenário 1



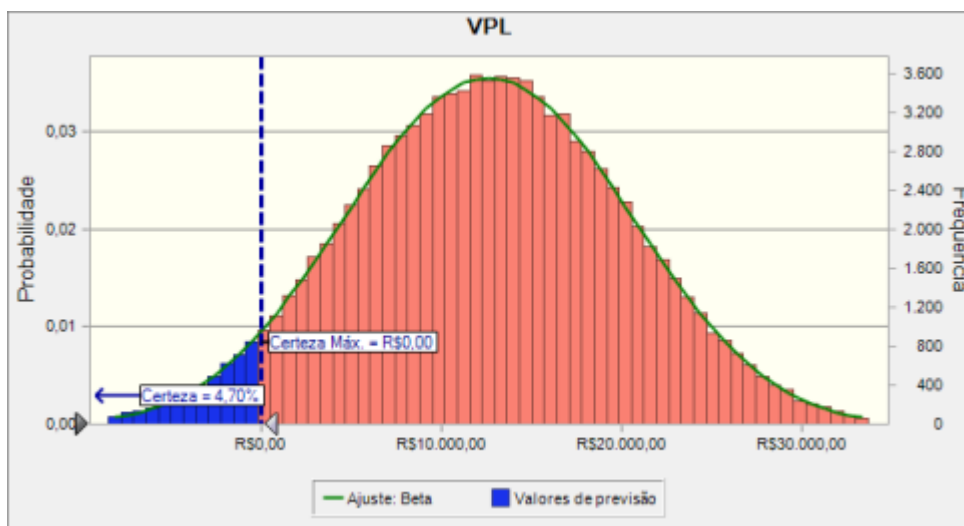
O Gráfico 26 apresenta a distribuição dos VPL para o cenário 2, oscilando entre os valores -R\$ 38.354,68 e R\$ 88.985,80. O valor mais provável é R\$ 31.852,78, com uma probabilidade de 4,91% do VPL ser negativo.

Gráfico 26 - VPL na situação RDesmont cenário 2



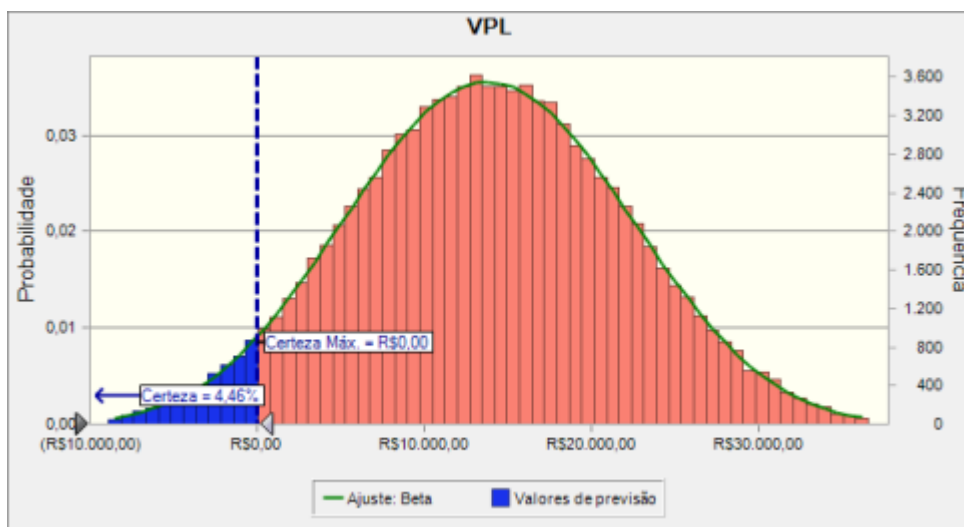
No Gráfico 27, são mostrados os VPL para o cenário 3, variando de -R\$ 14.383,41 a R\$ 40.504,91. O valor mais provável é R\$ 12.624,55, com uma probabilidade de 4,70% do VPL ser negativo.

Gráfico 27 - VPL na situação RDesmont cenário 3



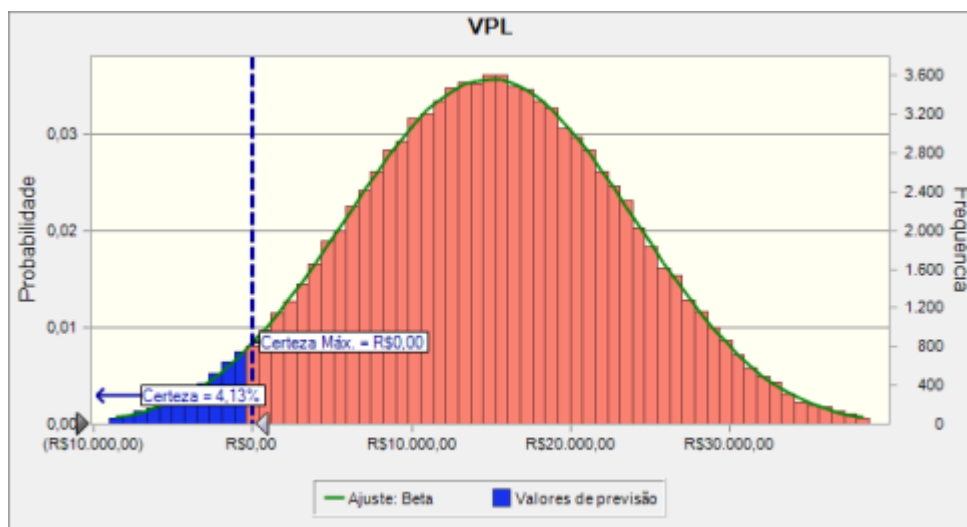
A distribuição dos VPL para o cenário 4 é exibida no Gráfico 28, com o resultado entre -R\$ 17.011,22 e R\$ 43.300,52. O valor mais provável é R\$ 13.837,07, com uma probabilidade de 4,46% do VPL ser negativo.

Gráfico 28 - VPL na situação RDesmont cenário 4



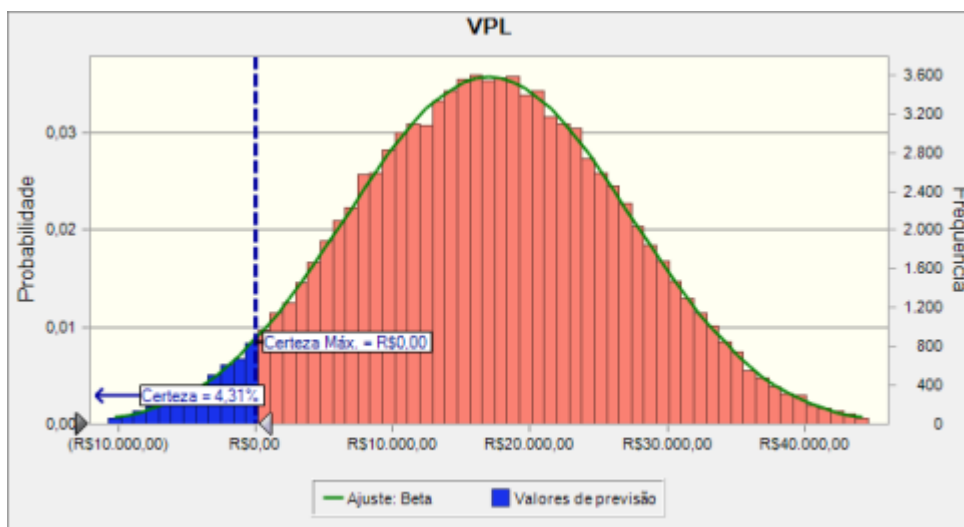
No Gráfico 29, é apresentada a distribuição dos VPL para o cenário 5, variando de -R\$ 17.706,64 a R\$ 45.417,15. O valor mais provável é R\$ 14.827,11, com uma probabilidade de 4,13% do VPL ser negativo.

Gráfico 29 - VPL na situação RDesmont cenário 5



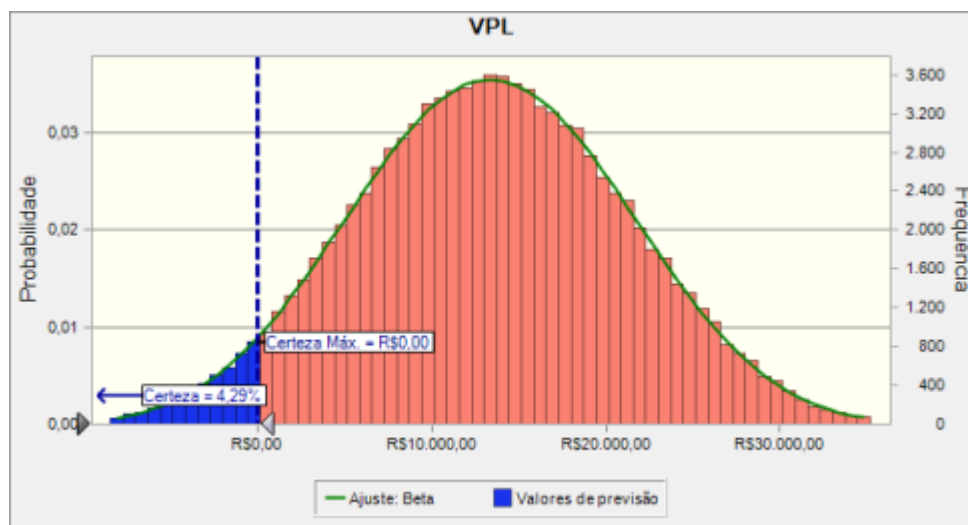
O Gráfico 30 mostra a distribuição dos VPL para o cenário 6, com resultados entre -R\$ 22.040,05 e R\$ 53.974,90. O valor mais provável é R\$ 16.933,87, com uma probabilidade de 4,31% do VPL ser negativo.

Gráfico 30 - VPL na situação RDesmont cenário 6



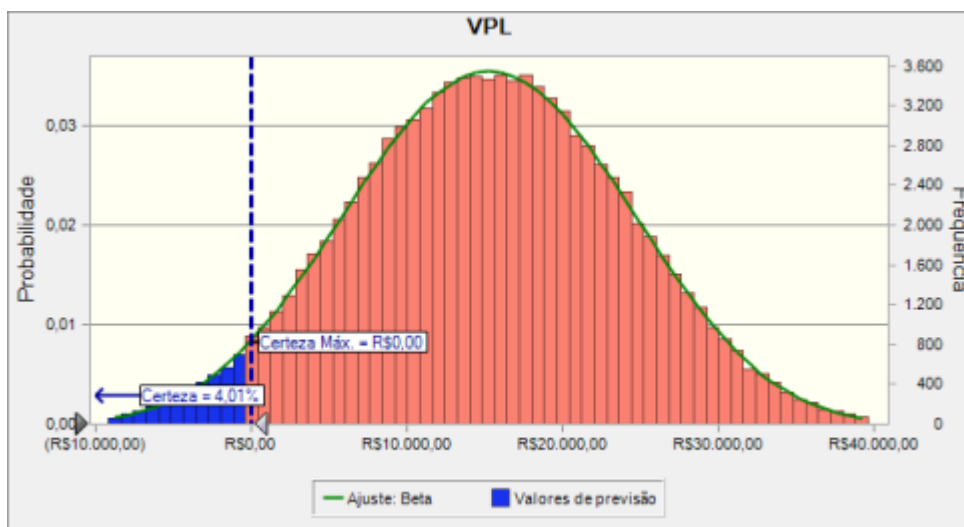
No Gráfico 31, são evidenciados os valores dos VPL para o cenário 7, com o resultado entre -R\$ 16.008,72 e R\$ 42.284,88. O valor mais provável é R\$ 13.346,92, com uma probabilidade de 4,29% do VPL ser negativo.

Gráfico 31 - VPL na situação RDesmont cenário 7



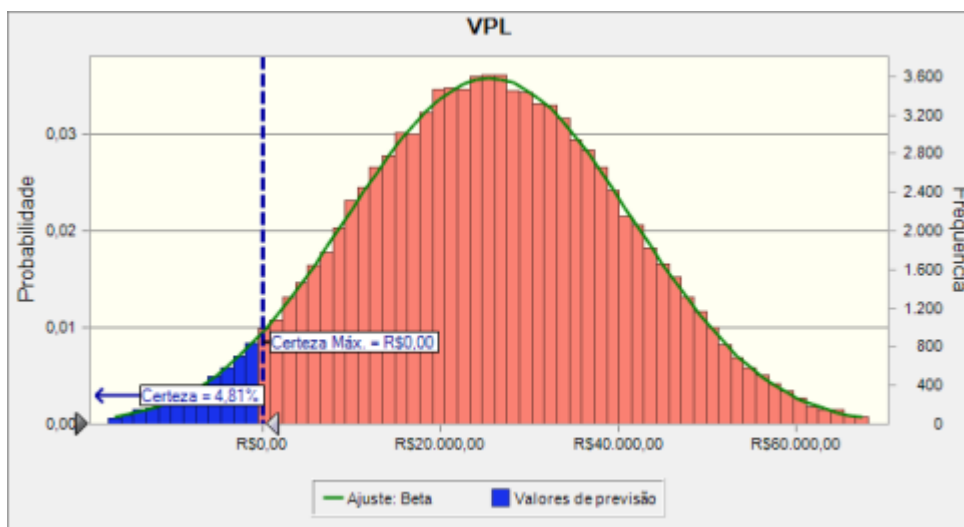
A distribuição dos VPL para o cenário 8 é mostrada no Gráfico 32, com o resultado entre -R\$ 16.503,52 e R\$ 46.473,63. O valor mais provável é R\$ 15.188,69, com uma probabilidade de 4,01% do VPL ser negativo.

Gráfico 32 - VPL na situação RDesmont cenário 8



No Gráfico 33, são exibidos os VPL para o cenário 9, com o resultado variando de -R\$ 33.288,74 a R\$ 84.254,30. O valor mais provável é R\$ 25.428,45, com uma probabilidade de 4,81% do VPL ser negativo.

Gráfico 33 - VPL na situação RDesmont cenário 9



ANEXO D - Relação dos trabalhos publicados pela autora:

1. CUNHA, F. G.; LIMA, R. S. F. *Systematic literature review on reverse logistics of waste electrical and electronic equipment: recommendations and opportunities for future research*. In: 29th IJCIEOM – *International Joint Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2023.
2. CUNHA, F. G.; ESTEVES, T. D.; LIMA, R. S.; PINHO, A. F. Logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos - um estudo de caso no Sul de Minas Gerais. In: XLIII ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2023.
3. CUNHA, F. G.; PINTO, W. G. M.; OLIVEIRA, R. P.; LIMA, R. S.; MONTEVECHI, J. A. B. Aplicação da simulação no processo de otimização da reciclagem de resíduos de saúde no Sul de Minas Gerais. In: XLIII ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2023.
4. BERNARDO, V. S.; CUNHA, F. G.; LIMA, R. S. Aplicação da técnica BPMN na logística reversa de medicamentos em desuso - um estudo de caso no Sul de Minas. In: XLIII ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2023.