

MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA PROJEÇÃO DE COLETAS DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

Matheus Faria Lima da Silva¹ (IC), Renato da Silva Lima¹ (PQ)

¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

Palavras-chave: Estatística. Logística Reversa. Resíduos Eletroeletrônicos. Simulação Computacional

Introdução

Equipamentos Eletroeletrônicos são aqueles com circuitos/componentes elétricos, como produtos de uso doméstico ou comercial, utensílios de cozinha, brinquedos, ferramentas e itens de tecnologia de informação e comunicação (Forti *et al.*, 2020), que se tornam resíduos quando descartados sem a intenção de reutilização, chamados então de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE).

A geração de REEE tem aumentado três vezes mais rápido do que a população mundial (Andeobu *et al.*, 2021), devido a avanços tecnológicos e econômicos, aumento da demanda e consumo, redução de sua vida útil e consequente aumento na sua geração (Borthakur e Govind, 2017). Nesse cenário, a gestão REEE é um desafio urgente, uma vez que o Brasil, o quinto maior gerador, apenas 0,7% do total gerado foi coletado formalmente em 2019, isto é, reciclado ou disposto de forma ambientalmente adequada (Forti *et al.*, 2020). Além disso, o país carece de dados confiáveis sobre métricas referentes a taxas de coleta e reciclagem de REEE e o destino dos recursos (Dias *et al.* (2022).

Embora existam leis para conduzir a gestão REEE, os volumes coletados formalmente são baixos, devido a falhas na responsabilização dos integrantes da cadeia (governos, setor privado e sociedade) e na disseminação de informações.

Investigando-se esses relacionamentos, considera-se que a cadeia reversa inicia-se do consumidor final, que é o principal ponto de partida para a gestão dos REEE (Islam *et al.*, 2021). Assim, foram investigados dados referentes a coletas de REEE aplicadas a amostras de consumidores finais, diretos ou indiretos, obtidos através de um projeto de doutorado ao qual este trabalho esteve vinculado.

A partir desses dados, este trabalho tem como objetivo utilizar a ferramenta de simulação computacional para a geração de cenários e projeção de resultados, com o intuito de observar o impacto de diferentes variáveis: o funcionamento da cadeia e suas respostas às coletas executadas, como quantidade de volumes coletados pelas amostras, tempo de coleta e tamanho das amostras. Estes resultados permitirão dimensionar que quantidade de consumidores será preciso alcançar para se coletar

determinadas quantidades de REEE em campanhas futuras, além de auxiliar na geração de taxas de coleta, contribuindo para preencher uma lacuna na literatura.

Metodologia

Através de um projeto de doutorado de uma instituição Federal de Ensino Superior do Sul de Minas, a UNIFEI, foram realizadas ações de coletas de REEE aplicadas as três amostras de consumidores finais (público universitário; público escolar infanto-juvenil; e oficinas de assistência eletrônica informais - OAE). Cada uma dessas ações foi chamada de Iniciativa 1, 2 e 3, respectivamente. Os resultados dessas ações foram compartilhados para com a presente pesquisa. Então, esses dados foram retratados através da Simulação Computacional, com o intuito de se conhecer informações não obtidas através das coletas, como as quantidades de pessoas efetivamente participantes, ou de material total coletado. E, ainda, para gerar projeções acerca do potencial de coletas futuras.

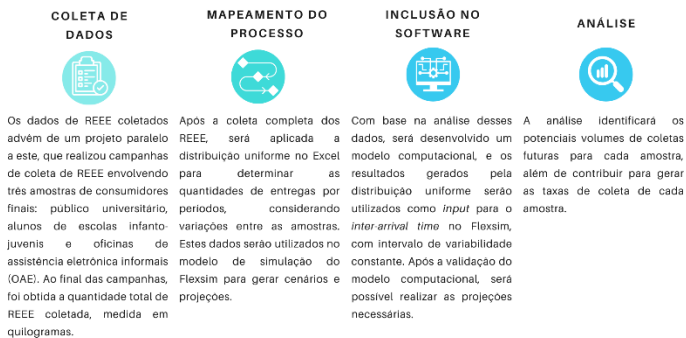
Um modelo de simulação é uma imitação de uma operação ou de um sistema real em um intervalo de tempo controlado, que possibilita a análise antecipada dos resultados, visando projetar comportamentos e avaliar estratégias (Gennaro *et al.*, 2017). As ferramentas de simulação possibilitam, a partir de métodos estatísticos, combinar as probabilidades de cenários esperados ocorrerem, mostrando seu impacto positivo ou negativo nos resultados (Felipe e Leismann, 2019).

Neste estudo, o sistema envolve variáveis estocásticas, isto é, a presença de elementos aleatórios, como a quantidade de volume coletado. Deste modo, utiliza-se o modelo de Simulação a Eventos Discretos, modelo que lida com dados aleatórios e discretos, capaz de incorporar os efeitos da variabilidade do sistema, utilizando distribuições de probabilidade e parâmetros, que são estimados para caracterizar as variáveis do sistema (Savia *et al.* 2018).

O *software* utilizado foi o *FlexSim*®, pois oferece uma ampla biblioteca de objetos e operações, além de ser gratuito e fácil de usar, possibilitando uma visão holística do processo a ser simulado (Syahputri *et al.*, 2021). Os modelos de cada Iniciativa então foram criados e validados, isto é, verificados em relação à sua proximidade

com a realidade. A Figura 1 apresenta as etapas do trabalho. Em seguida, foram propostos cenários, como descrito a seguir.

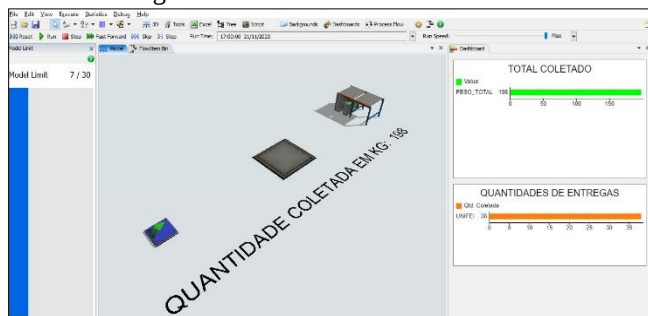
Figura 1 - Etapas do trabalho



Resultados e discussão

Para simular a Iniciativa 1, campanha de coleta de REEE na UNIFEI (9000 pessoas) em Itajubá, foi utilizada uma distribuição uniforme para os pesos dos resíduos (entre 0,14kg para cabos e 10kg para desktops). Uma distribuição uniforme também foi aplicada à quantidade de pessoas que entregaram resíduos, variando entre manhã e tarde, considerando o período de duas semanas, em que os dados gerados no Excel® e inseridos no FlexSim®. O modelo foi validado com um total simulado de 198kg, (muito próximo do valor real de 199kg,) representando 38 participantes de acordo com a Figura 2.

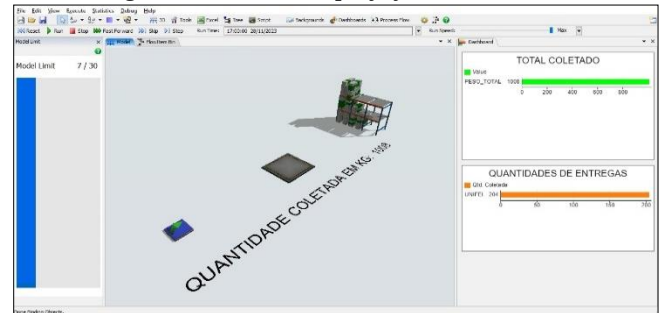
Figura 2 - Modelo real da Iniciativa 1



Para obter uma previsão de aumento da coleta, foi realizada uma simulação no FlexSim® para um período de 28 dias, para a qual foram ajustadas as quantidades máximas de participantes, mantendo-se a distribuição uniforme. Assim, o modelo estimou uma coleta total de 1008kg, contabilizando a participação de 204 pessoas, conforme ilustrado na Fig. 3.

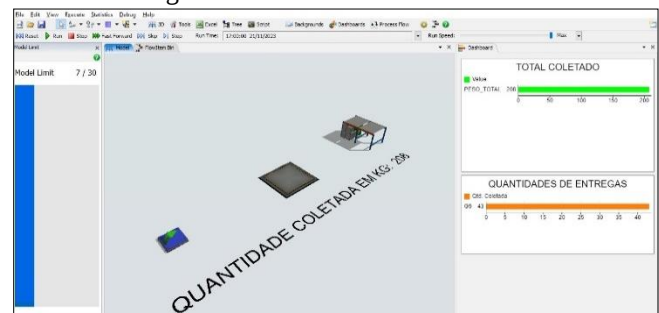
Com base na análise da amostra real (38 participantes entre 9000 pessoas), concluiu-se que seria preciso atingir um público de 48.315 pessoas, equivalente a cinco universidades de porte semelhante.

Figura 3 - Modelo de projeção da Iniciativa 1



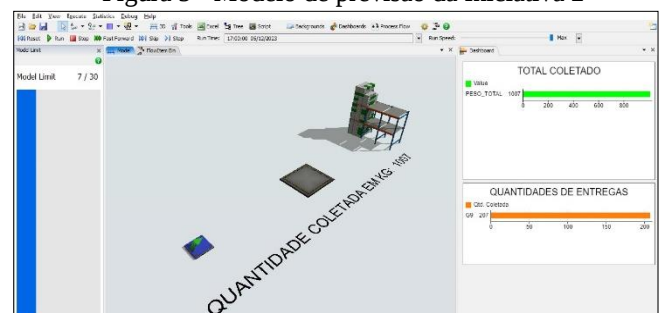
Para a simulação da Iniciativa 2, campanha de coleta realizada em uma escola privada de ensino fundamental e médio de Itajubá (640 pessoas), foram mantidos parâmetros semelhantes ao modelo anterior, com uma distribuição uniforme de pesos variando entre 0,14kg e 9,8kg. Valores aleatórios de participação foram gerados para os períodos da manhã e tarde ao longo de 21 dias úteis. O modelo estimou um total de 208kg de resíduos coletados, próximo do valor real de 210kg, com 43 participantes, conforme a Fig. 4.

Figura 4 - Modelo real da Iniciativa 2



Com o intuito de obter uma previsão, realizou-se uma simulação deste modelo para o período de 35 dias. Manteve-se a mesma distribuição uniforme, modificando-se as quantidades de pessoas participantes a cada período do dia. Portanto, o modelo de previsão obteve o valor de 1007kg para o período de 35 dias, considerando 207 entregas (Fig. 5).

Figura 5 - Modelo de previsão da Iniciativa 2

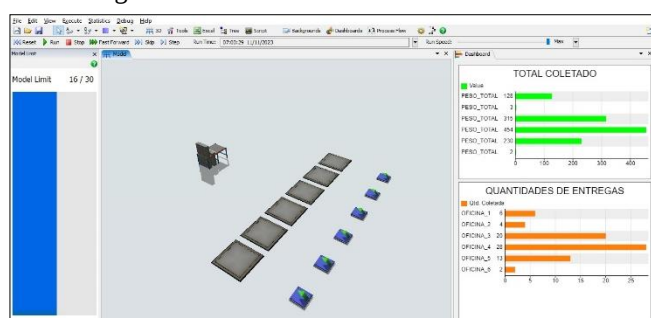


Considerando-se a amostra real (43 entradas entre 640 pessoas), para se atingir cerca de 1007kg seria preciso envolver uma amostra de 3080 pessoas nas escolas, equivalente a cerca de cinco escolas deste mesmo porte.

A Iniciativa 3, campanha de coleta das OAE, foi aplicada a duas cidades do sul de Minas Gerais, São Gonçalo do Sapucaí (SGS) e Itajubá. Para a simulação da campanha de SGS, considerou-se apenas o parâmetro de variabilidade nos pesos dos REEE coletados, também gerados por distribuição uniforme, entre 0,2kg (cabos) até 39,5kg (lavadoras), distribuídos entre seis OAE participantes.

Assim, o modelo simulado demonstrou-se validado pelos seguintes valores para cada OAE: Oficina 1: 129kg (real: 130kg); Oficina 2: 3kg (igual ao real); Oficina 3: 320kg (real: 321kg); Oficina 4: 449kg (real: 451kg); Oficina 5: 228kg (igual ao real); Oficina 6: 2kg (igual ao real). A Fig. 6 apresenta este modelo. Neste caso, as entradas (quantidades de entregas) não caracterizam pessoas participantes, e sim quantidades de REEE coletadas em cada OAE. Sua soma resulta em 73 REEE coletados.

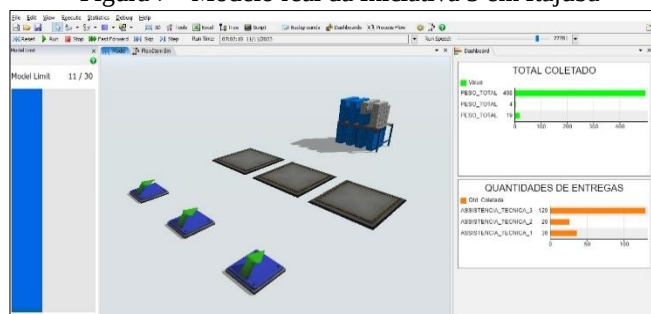
Figura 6 - Modelo real da Iniciativa 3 em SGS



Para as OAE de Itajubá, seguiu-se o mesmo modelo de SGS, de modo que os parâmetros de peso coletado também foram gerados por distribuição uniforme, entre três OAE participantes.

Assim, o modelo foi validado, demonstrando coletas próximas da realidade, como mostra a Figura 7 a seguir, sendo respectivamente 498kg na OAE de eletrodomésticos (500kg no cenário real), e 4kg e 19kg nas OAE de celulares (4kg e 20kg nos cenários reais).

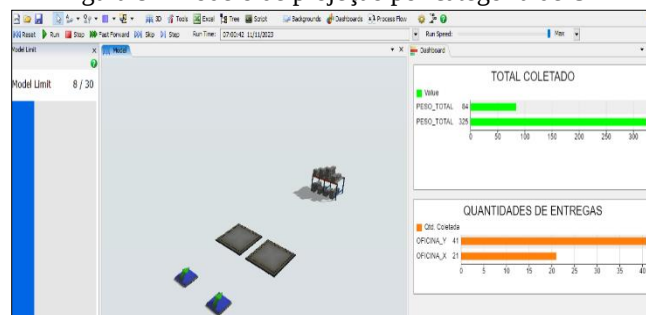
Figura 7 - Modelo real da Iniciativa 3 em Itajubá



Novamente, as entregas (quantidades de entregas) correspondem às quantidades de REEE coletadas em cada OAE, sendo 129 itens na OAE de eletrodomésticos; 26 e 36 itens nas OAE de celulares (Fig. 7), somando 191 REEE coletados.

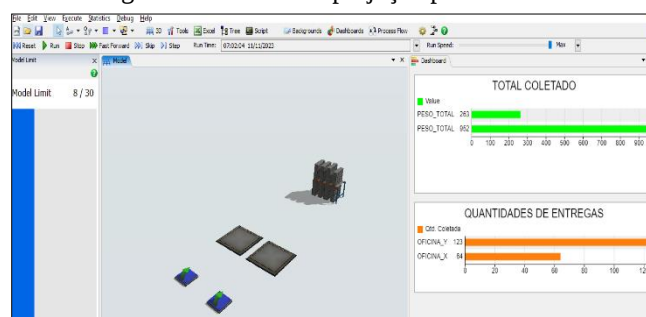
Para gerar projeções do cenário das OAE, utilizou-se como referência os dados das duas coletas, considerando-se os pesos mínimos e máximos coletados em cada OAE, que foram agrupados de acordo com a categoria da OAE (eletrodomésticos em geral e celulares e *notebooks*), e o tempo gerado pelo *software* para se atingir estes valores. Assim, o valor mostrado na Fig. 8 como “OFICINA_Y” corresponde à média dos valores do agrupamento das OAE de celulares/*notebooks* (de 0,15kg a 3,8kg). “OFICINA_X” corresponde à média do agrupamento das oficinas de eletrodomésticos em geral (de 0,2kg a 32kg). Portanto, de acordo com a projeção, em uma campanha pontual, uma OAE de celulares/*notebooks* seria capaz de coletar 84kg, e uma OAE de eletrodomésticos 325kg.

Figura 8 - Modelo de projeção por categoria de OAE



Considerando-se três oficinas de cada tipo (seis ao todo), e triplicando-se também os tempos de entregas usado pelo *software* para os cálculos, seria possível coletar 263kg em OAE de celulares/*notebooks*, e 952kg em OAE de eletrodomésticos (Fig. 9), somando-se 1215kg. Esta soma corresponde a 187 unidades de REEE coletados.

Figura 9 - Modelo de projeção para seis OAE



Em síntese, a ferramenta de simulação permitiu modelar e projetar cenários com base nas iniciativas testadas pelas campanhas de coleta, e levantar informações que não

puderam ser obtidas na prática.

A partir desses resultados, foi possível estabelecer a taxa de captação de REEE de cada amostra, índice que mede a porcentagem de resíduos efetivamente coletados em relação à quantidade de resíduos que se tem o potencial de capturar (tamanho da amostra $\times$ média de geração *per capita*). Neste caso, considera-se que o total de REEE gerado *per capita* é de cerca de 10kg (Forti *et al.* 2020).

A Tabela 3 resume as projeções das Iniciativas com suas respectivas taxas de captação. Assim, portanto, é possível se definir metas para campanhas futuras baseadas em potencial de coleta.

Tabela 1 - Síntese dos resultados em valores numéricos

Público/elo	Volume de coleta	Quantidade a ser alcançada por público	Taxa de captação
Público universitário	1008kg	5 universidades (9000 pessoas cada)	0,22%
Público escolar infantil-juvenil	1007kg	5 escolas (640 alunos cada)	3,30%
OAE eletrodomésticos e celulares/notebook	1215kg	6 oficinas (três de cada categoria)	0,90%

Conclusões

Esta pesquisa simulou e validou parâmetros para campanhas futuras de coleta de REEE, alcançando alta precisão ao comparar a simulação com dados reais. O desenvolvimento do modelo no *FlexSim* foi desafiador, exigindo habilidades no software, e a integração com o Excel foi fundamental para gerar e analisar os dados.

A simulação provou ser uma ferramenta essencial para planejar campanhas e otimizar recursos, permitindo a criação de cenários controlados e precisos, reduzindo erros e o tempo de estudo, além de proporcionar análises mais robustas.

Os resultados demonstram que campanhas de coleta de REEE direcionadas ao consumidor final, especialmente para o público acadêmico e escolar infantil-juvenil, são eficazes em coletar volumes significativos. Apesar de baixa participação em número de OAE, estas também têm alto potencial de geração de resíduos em volume.

As previsões simuladas demonstram que futuras campanhas pontuais de coleta têm a capacidade de arrecadar cerca de 1ton de REEE em cinco universidades, 1ton em cinco escolas privadas, e mais 1ton aplicadas a cada 6 OAE. Os resultados também revelam o potencial de captação de REEE de cada amostra.

Em estudos futuros, pode-se realizar revisões de literatura referentes à aplicação de modelagens e simulações similares globalmente, comparando seus métodos e resultados com os desta pesquisa. Os resultados aqui obtidos também podem contribuir para estudos futuros que integrem as ferramentas de simulação a parâmetros ambientais, como técnicas de eficiência ambiental, que poderão fornecer uma base sólida para o desenvolvimento

de soluções mais sustentáveis, otimizando a gestão de resíduos e promovendo práticas ambientalmente responsáveis em diversas áreas.

Agradecimentos

Expresso meus sinceros agradecimentos ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro concedido aos projetos que tornaram possível o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

ANDEOBU, L.; WIBOWO, S.; GRANDHI, S. A Systematic review of e-waste generation and environmental management of Asia Pacific countries. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 17, p. 1-18, 2021.

BORTHAKUR, A.; GOVIND, M. Emerging trends in consumers' e-waste disposal behavior and awareness: A worldwide overview with special focus on India, **Resources, Conservation and Recycling**, v. 117 (Part B), p. 102-113, 2017.

DIAS, P. [et al.]. Electronic waste in Brazil: Generation, collection, recycling and the covid pandemic, **Cleaner Waste Systems**, 3, p. 1-13, 2022.

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, 2019.

FORTI, V.; BALDÉ, 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), Bonn/Geneva/Rotterdam, 2020.

GENNARO, C. K.; CORREA, M. S.; OLIVEIRA, M. C.; 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, 2017.

ISLAM, M. T. [et al.]. A global review of consumer behavior towards e-waste and implications for the circular economy, **Journal of Cleaner Production**, v. 237, p. 1-21, 2019.

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.

SAVIA, T.; MACIEL, T. C. P.; SILVA NETO, K. O. A. Simulação a eventos discretos aplicado em um restaurante universitário. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Produção, XXXVIII**, 2018, Maceió. Anais [...]. Maceió: ABEPRO, 2018, p. 1-24.

SYAHPUTRI, K.; SARI, R. M.; RIZKYA, I.; TARIGAN, U.; AGUSTINA. Simulation of vise production process using Flexsim Software. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 1122, n.1, p. 1-7, 2021.