

INSTITUTO FEDERAL DE ALAGOAS
MESTRADO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS

WISNNER FRANKLIN DOS SANTOS SILVA

**AraREEE: UMA SOLUÇÃO DE SOFTWARE BASEADA NA PARTICIPAÇÃO
CIDADÃ ELETRÔNICA PARA O DESCARTE AMBIENTALMENTE ADEQUADO
DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NO MUNICÍPIO
DE ARAPIRACA-AL**

Marechal Deodoro - AL

2026

WISNNER FRANKLIN DOS SANTOS SILVA

**AraREEE: UMA SOLUÇÃO DE SOFTWARE BASEADA NA PARTICIPAÇÃO
CIDADÃ ELETRÔNICA PARA O DESCARTE AMBIENTALMENTE ADEQUADO
DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NO MUNICÍPIO
DE ARAPIRACA-AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Programa de Pós-Graduação em
Tecnologias Ambientais (Modalidade
Mestrado Profissional) como requisito para a
obtenção do título de Mestre em Tecnologias
Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Marcílio F. de Souza
Junior

Marechal Deodoro - AL

2026

363.7
S586a

Silva, Wisnner Franklin dos Santos.

AraREEE : uma solução de software baseada na participação cidadã eletrônica para o descarte ambientalmente adequado de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no município de Arapiraca - AL / Wisnner Franklin dos Santos Silva. – Dados eletrônicos (1 arquivo : 4.476 KB). – 2026.

Sistema requerido: Adobe Acrobat Reader.

Modo de acesso: Internet.

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologias Ambientais) – Instituto Federal de Alagoas, *Campus Marechal Deodoro*, Marechal Deodoro, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Marcílio Ferreira de Souza Júnior.

1. Gestão de resíduos. 2. Logística reversa. 3. Lixo eletrônico. 4. REEE. 5. Sustentabilidade. I. Souza Júnior, Marcílio Ferreira. II. Título.

WISNNER FRANKLIN DOS SANTOS SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Programa de Pós-Graduação
em Tecnologias Ambientais (Modalidade
Mestrado Profissional) como requisito para
a obtenção do título de Mestre em
Tecnologias Ambientais.

Aprovado em 29 de janeiro de 2026.

Orientador:

Documento assinado digitalmente
 **MARCILIO FERREIRA DE SOUZA JUNIOR**
Data: 29/01/2026 12:04:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Marcílio Ferreira de Souza Júnior – CODAI/UFRPE

Banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **LUCAS SUASSUNA DE ALBUQUERQUE WANDER**
Data: 30/01/2026 14:23:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Lucas Suassuna de Albuquerque Wanderley – IFAL / Campus Coruripe

Documento assinado digitalmente
 **CASSIANO HENRIQUE DE ALBUQUERQUE**
Data: 29/01/2026 17:33:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Cassiano Henrique de Albuquerque – IFAL / Campus Maragogi

Marechal Deodoro, AL

2026

SILVA, W. F. S. AraREEE: Uma solução de software baseada na participação cidadã eletrônica para o descarte ambientalmente adequado de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos no município de Arapiraca-al. 112 f. 2026. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Campus Marechal Deodoro, Instituto Federal de Alagoas, Marechal Deodoro, 2026.

RESUMO

O avanço tecnológico e a obsolescência programada resultam na geração crescente de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) em todo o mundo e causam impactos ambientais e de saúde pública. Em 2019, na América do Sul, somente 0,7% do REEE foi reciclado e contribuiu para sérios problemas ambientais. O Brasil, por sua vez, é responsável por uma média de geração anual do volume de REEE de 10,2 kg por habitante, que é superior à média mundial de 7,3 kg por habitante, caracterizando-se, assim, como uma problemática que é enfrentada por cidades de grande, médio e pequeno portes na gestão desses resíduos. O presente trabalho desenvolveu uma solução de *software* de participação cidadã eletrônica para o descarte ambientalmente adequado desses resíduos no contexto de Arapiraca-AL. Para tanto, o procedimento metodológico utilizou uma abordagem descritiva e mista (quali-quantitativa) e adotou o método da *Design Science Research Methodology (DSRM)* com cinco etapas: 1) Identificou-se o problema de pesquisa; 2) Realizou-se uma Revisão Sistemática da Literatura para mapear soluções de *software* para logística reversa de REEE e identificaram-se lacunas existentes; 3) Desenvolveu-se uma solução de *software* participativa para melhorar a gestão de REEE; 4) Executou-se uma avaliação de desempenho do artefato; 5) Validou-se o artefato desenvolvido e captaram-se as percepções acerca do descarte de REEE. Espera-se que com o desenvolvimento da solução haja um aumento na sensibilização da população sobre o descarte correto de REEE, eliminando barreiras logísticas e incentivando a participação cidadã na reciclagem, identificação e correção dos pontos de descarte irregular, geração de dados e *insights* que possam informar a criação de políticas públicas mais eficazes para a gestão de REEE, melhorando a transparência na gestão desse tipo de resíduo, permitindo uma prestação de contas mais clara à população.

Palavras-chave: Gestão de resíduos; Logística Reversa; Lixo Eletrônico; REEE; Sustentabilidade.

SILVA, W. F. S. AraREEE: A software solution based on electronic citizen participation for the environmentally sound disposal of Waste Electrical and Electronic Equipment in the municipality of Arapiraca, Alagoas. 112 p. 2026. Master's Thesis (Master in Environmental Technologies) – Marechal Deodoro Campus, Federal Institute of Alagoas, Marechal Deodoro, 2026.

ABSTRACT

Technological advancement and planned obsolescence result in the increasing generation of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) worldwide, posing significant environmental and public health challenges. In 2019, only 0.7% of WEEE in South America was recycled, contributing to severe environmental issues. Brazil, in turn, generates an annual average of 10.2 kg of WEEE per capita, exceeding the global average of 7.3 kg, representing a critical challenge for e-waste management in large, medium, and small-sized cities. This study developed an electronic civic engagement software solution for the environmentally sound disposal of such waste within the context of Arapiraca-AL. To this end, the methodological procedure employed a descriptive and mixed-methods approach (qualitative-quantitative), adopting the Design Science Research Methodology (DSRM) across five stages: 1) Identification of the research problem; 2) A Systematic Literature Review to map software solutions for WEEE reverse logistics and identify existing gaps; 3) Development of a participatory software solution to enhance WEEE management; 4) Performance evaluation of the artifact; and 5) Validation of the developed artifact, capturing perceptions regarding WEEE disposal. It is expected that this solution will increase public awareness of proper WEEE disposal, eliminating logistical barriers and encouraging civic participation in recycling, identifying and correcting irregular disposal points, and generating data and insights to inform more effective public policies, thereby enhancing transparency and accountability in waste management.

Key words: Waste Management, Reverse Logistics, E-waste, WEEE, Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Quadro 1 – Localização dos Ecopontos em Arapiraca-AL.....	18
Figura 1 – Etapas da investigação.....	28
Figura 2 – Fluxo das etapas da DSRM.....	32
Figura 3 – Etapas da Metodologia de Pesquisa.....	33

LISTA DE ABREVIATURAS

AL – Alagoas

ASCARA – Associação dos Catadores de Resíduos Sólidos de Arapiraca

BaaS – Backend-as-a-Service

BI – Business Intelligence

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CBH – Comitê de Bacia Hidrográfica

COMDEMA – Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente

CTR – Centro de Tratamento de Resíduos

DSRM – Design Science Research Methodology

EEE – Equipamentos Eletroeletrônicos

IA – Inteligência Artificial

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IFAL – Instituto Federal de Alagoas

IoT – Internet of Things

OAB – Ordem dos Advogados do Brasil

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU – Organização das Nações Unidas

PEVs – Pontos de Entrega Voluntária

PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

PNRS – Política Nacional de Resíduos Sólidos

PRISMA – Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses

PTT – Produto Técnico Tecnológico

REEE – Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos

RFID – Radio Frequency Identification

RSL – Revisão Sistemática da Literatura

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SciELO – Scientific Electronic Library Online

SENAC – Serviço Nacional de Aprendizagem Comercial

SINIR – Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos

SUS – System Usability Scale

TICs – Tecnologias da Informação e Comunicação

UFAL – Universidade Federal de Alagoas

UNITAR – United Nations Institute for Training and Research

UNU – Universidade das Nações Unidas

WEEE – Waste Electrical and Electronic Equipment

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
Quadro 1 – Localização dos Ecopontos em Arapiraca-AL.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	17
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	18
2 REFERENCIAL CONCEITUAL.....	19
2.1 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE).....	19
2.1.2 Descarte ambientalmente adequado de reee.....	20
2.2 PARTICIPAÇÃO ELETRÔNICA (E-PARTICIPATION).....	21
2.2.1 Exclusão digital.....	22
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	23
3.1 DESENHO DA PESQUISA.....	23
3.2 DESIGN SCIENCE RESEARCH METHODOLOGY (DSRM).....	27
3.3 DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DA SOLUÇÃO DE E-PARTICIPATION.....	29
REFERÊNCIAS.....	32
5 CAPÍTULO I.....	38
5.1 INTRODUÇÃO.....	39
5.2 LOGÍSTICA REVERSA E A GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS..	42
5.3 METODOLOGIA.....	44
5.4 RESULTADOS.....	47
5.4.1 Soluções tecnológicas voltadas ao descarte ambientalmente adequado de reee.....	55
5.4.2 Iniciativas que promovem a participação eletrônica da população no processo de descarte de reee.....	58
5.4.3 Análise crítica das metodologias empregadas nos estudos selecionados.....	60
5.5 DISCUSSÃO.....	62
5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
REFERÊNCIAS.....	66
6 CAPÍTULO II.....	72
6.1 INTRODUÇÃO.....	73
6.2 METODOLOGIA.....	77
6.2.1 Pesquisa observacional e análise do contexto local.....	79
6.2.2 Prototipação da solução.....	80
6.2.3 Requisitos funcionais.....	81
6.2.4 Requisitos não funcionais.....	82

6.2.5 Arquitetura da solução proposta.....	83
6.2.6 Instrumento de avaliação de usabilidade: system usability scale (sus).....	85
6.2.6.1 Cálculo do score sus.....	86
6.3 RESULTADOS.....	87
6.4 DISCUSSÃO.....	97
7 CONCLUSÃO.....	99
REFERÊNCIAS.....	100
8 CONCLUSÃO.....	106
8.1 PRODUÇÃO DE PRODUTO TÉCNICO / TECNOLÓGICO.....	107
8.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	108
8.3 TRABALHOS FUTUROS.....	109
APÊNDICE A – TELA PRINCIPAL.....	111
APÊNDICE B – TELA DE COLETA.....	112
APÊNDICE C – TELA DE DENÚNCIA.....	113

1 INTRODUÇÃO

A gestão ambientalmente adequada dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) é uma questão central atual devido à crescente produção de dispositivos eletroeletrônicos, como computadores, celulares e eletrodomésticos, que representa um dos desafios mais urgentes para a gestão ambiental e de resíduos em nível global (Beula; Sureshkumar, 2021).

Esse crescimento está relacionado ao avanço tecnológico, ao aumento do poder aquisitivo e à obsolescência programada. A quantidade de REEE gerada tem aumentado exponencialmente, trazendo consigo uma série de problemas ambientais, de saúde pública e socioeconômicos (Favero *et al.*, 2019). Em razão disso, diversos mecanismos vêm sendo criados com o intuito de diminuir os impactos ambientais e à saúde humana gerados pela disposição inadequada destes resíduos, conforme Beula e Sureshkumar (2021).

Segundo Forti *et al.* (2020), a produção mundial de REEE atingiu 53,6 milhões de toneladas em 2019, o que corresponde a uma geração média de 7,3 kg por habitante. No referido estudo, evidenciou-se que o continente asiático é o maior gerador de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos, com 24,9 milhões de toneladas (5,6 kg per capita), seguido pelas Américas, com aproximadamente 13,1 milhões de toneladas (13,3 kg per capita).

Na América do Sul, o Brasil é o líder na geração de REEE, ocupando a quinta posição no ranking mundial (Green Eletron, 2021). De acordo com o relatório do *The Global E-waste Monitor 2020*, desenvolvido pela Universidade das Nações Unidas (UNU) em parceria com demais organizações internacionais, o Brasil gerou mais de 2 milhões de toneladas de resíduos em 2019, com produção per capita de 10,20 kg. Ademais, o percentual de reciclagem na América do Sul é baixíssimo, com índice de apenas 0,7% e configura-se como um sério problema ambiental (Forti *et al.*, 2020).

A disposição inadequada de REEE causa graves impactos ambientais, como contaminação do solo, da água e do ar atmosférico, devido à presença de substâncias tóxicas, como metais pesados e produtos químicos. Além disso, há riscos para a saúde pública, pois a exposição a essas substâncias pode causar danos ao sistema nervoso, endócrino e reprodutivo humano (Pontes; Giordano, 2015).

Levando-se em consideração os efeitos danosos relacionados à disposição irregular dos REEE, legislações e decretos foram elaborados com o objetivo de mitigar os impactos ambientais gerados. No âmbito Federal, a Lei nº 12.305 de agosto de 2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em seu artigo 33 destaca a importância da logística reversa e do envolvimento de todos os agentes (consumidores, comerciantes e fabricantes) no ciclo de vida dos Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE) no Brasil (Brasil, 2010).

Após 10 anos da publicação da PNRS, não houve cobrança eficaz e envolvimento dos agentes responsáveis pela implementação da logística reversa. Apenas em 2020 houve a criação do Decreto nº 10.240/2020, objetivando regulamentar e normatizar a aplicação da logística reversa para equipamentos eletroeletrônicos de uso doméstico, conforme disposto no artigo 1º (Brasil, 2020). Esse marco regulatório também é destacado por Moraes *et al.* (2021) como essencial para o setor, pois prevê um cronograma de implantação do sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico em todos os estados brasileiros.

A escolha do município de Arapiraca-AL como objeto de estudo procede-se pela sua relevância estratégica localizada no agreste do Estado de Alagoas e pelo momento crítico de transição normativa que atravessa. Como um dos principais pólos de desenvolvimento do interior do Estado de Alagoas, a cidade experimentou um crescimento econômico e populacional acelerado, impulsionado pelos setores têxtil, alimentício e moveleiro (Prefeitura de Arapiraca, 2023). Esse dinamismo econômico resultou num aumento expressivo do consumo e, conseqüentemente, da geração de REEE, criando um desafio de gestão que reflete a realidade de muitas cidades médias brasileiras em expansão.

Além disso, Arapiraca vive um descompasso regulatório que carece de investigação: embora possua instrumentos legais municipais, estes são anteriores ao Decreto Federal nº 10.240/2020 e não contemplam especificamente a logística reversa de eletroeletrônicos. No entanto, o município foi explicitamente incluído no cronograma federal para implementação de sistemas de logística reversa, com metas de cobertura estabelecidas já para 2024, quando o município deveria ter uma cobertura mínima de 12% de seus REEE atendidos pela logística reversa, alcançando 17% em 2025 (Brasil, 2020). Portanto, analisar Arapiraca neste momento permite compreender as barreiras e oportunidades na aplicação de políticas nacionais num contexto local que, apesar de possuir 4 ecopontos (Prefeitura de Arapiraca, 2023) e 33 Pontos

de Entrega Voluntária (PEVs) (Prefeitura de Arapiraca, 2020), ainda enfrenta altos índices de descarte irregular e mistura de resíduos.

A regulamentação municipal que trata dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos em Arapiraca desde 2001 (Lei nº 2.221/2001), também conhecida como Código Municipal de Meio Ambiente, estabeleceu normas para a limpeza urbana, coleta, transporte, tratamento e destinação final dos resíduos sólidos no município, mas não trata especificamente sobre a destinação de REEE. Mesmo o Decreto Municipal nº 2.226/2011, que regulamenta alguns dispositivos da lei 2.221/2001, faz referência somente ao descarte de resíduos da construção civil (Prefeitura de Arapiraca, 2001, 2011).

Ainda no contexto municipal de Arapiraca, a Lei 3.040 de 2014 criou o Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente (COMDEMA), cujo objetivo é assessorar a gestão municipal em temáticas ambientais, porém, o texto legislativo não cita o tratamento de REEE. Por sua vez, a Lei nº 3.372 de 2019, que estabeleceu as responsabilidades pela coleta seletiva e contínua de lixo em Arapiraca, traz em seu Art. 9º uma moção que diz respeito ao descarte seguir normas apropriadas, promovendo parcerias com os fornecedores desses produtos (Prefeitura de Arapiraca, 2014; 2019). Ou seja, todas as legislações municipais supracitadas foram promulgadas antes do Decreto 10.240/2020, consistindo em uma lacuna para o referido município.

De fato, a geração de REEE em Arapiraca está diretamente relacionada ao seu desenvolvimento econômico e populacional (IBGE, 2020). O crescimento econômico atraiu novos moradores, contribuindo para o aumento da população e, consequentemente, para a geração de mais resíduos. Esse ciclo evidencia a importância de estratégias para gestão de resíduos sólidos especiais para acompanhar o desenvolvimento urbano sustentável de Arapiraca. Portanto, a gestão ambientalmente adequada de REEE requer a implementação de soluções inovadoras, que promovam a participação ativa da comunidade (Carvalho; Xavier, 2014).

Por outro lado, a relevância desta investigação ultrapassa o contexto local e dialoga diretamente com a agenda global de sustentabilidade, alinhando-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU). Especificamente, este trabalho contribui para o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), ao propor uma ferramenta que visa reduzir o impacto ambiental negativo per capita da cidade de Arapiraca, com especial atenção à gestão de resíduos municipais. Além

disso, a proposta insere-se no ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), cuja meta 12.5 preconiza a redução substancial da geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reutilização. Por fim, ao integrar tecnologia e inovação na gestão pública, o estudo tangencia o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestruturas), demonstrando como soluções de *software* e participação eletrônica (*e-participation*) podem modernizar a infraestrutura de gestão de resíduos e promover a industrialização inclusiva e sustentável.

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

Apesar da implementação de legislações federais como a PNRS e o Decreto nº 10.240/2020, que estabeleceram a logística reversa para REEE, a fiscalização e o envolvimento dos agentes responsáveis ainda são insuficientes. No contexto municipal, a cidade de Arapiraca, no Estado de Alagoas, é um exemplo dessa lacuna legislativa e gerencial. Embora seu crescimento econômico e populacional impulsione a geração de REEE, suas legislações municipais (Lei nº 2.221/2001, Decreto nº 2.226/2011, Lei nº 3.040/2014 e Lei nº 3.372/2019) são anteriores ao Decreto 10.240/2020 e não abordam especificamente a destinação de REEE, criando uma defasagem regulatória séria para a cidade.

Atualmente, o município de Arapiraca-AL dispõe de uma infraestrutura composta por 4 (quatro) ecopontos para o descarte de recicláveis, inclusive eletroeletrônicos (Prefeitura de Arapiraca, 2023), e 33 (trinta e três) Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) voltados ao descarte consciente de materiais (Prefeitura de Arapiraca, 2020). Entretanto, dados do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos (SINIR, 2020) apontam que uma parcela significativa dos REEE ainda é destinada incorretamente junto aos resíduos comuns, o que agrava a contaminação ambiental e o desperdício de recursos. Este cenário evidencia a necessidade de aprimorar a participação da comunidade e aumentar a eficiência da gestão dos REEE no município. O Quadro 1 detalha a localização atual dos ecopontos disponíveis na cidade.

Quadro 1 – Localização dos Ecopontos em Arapiraca-AL

Logradouro	Ponto de Referência	Bairro
Rua José Luís de Almeida, 471	Próximo ao Centro de Medicina e Reabilitação Física (CEMFRA)	Cavaco
Rua Engenheiro Camilo Collier, 213	Próximo ao Centro de Referência em	Primavera

	Assistência Social (CRAS)	
Rua Cabo Jeovane Pereira da Silva, 10	Nas proximidades do Auto Posto Amigão	Nova Esperança
Rua Miguel Pedro Lima, 307	Nos arredores da Academia de Saúde	Bom Sucesso

Fonte: Prefeitura de Arapiraca, 2023.

Diante dessa problemática, apresenta-se a seguinte questão de pesquisa: como a implementação de uma solução de *software* que promova a participação social e eletrônica dos cidadãos pode facilitar o descarte adequado e aprimorar a gestão ambiental dos REEE em Arapiraca-AL?

Face ao exposto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma solução de *software* dedicada a facilitar a participação social e eletrônica da população no descarte adequado de REEE no contexto de Arapiraca-AL.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e específicos impactam na definição do propósito e no escopo da investigação científica. O objetivo geral serve como guia ou foco principal da pesquisa e os objetivos específicos servem de suporte para os pilares, auxiliando na escolha dos métodos de coleta e análise dos dados, garantindo que o trabalho seja intencional e coeso (Gil, 2002).

1.2.1 Objetivo geral

Propor uma solução de *software* para participação eletrônica no descarte ambientalmente adequado de resíduos eletroeletrônicos no município de Arapiraca-AL.

1.2.2 Objetivos específicos

- Mapear, através de uma Revisão Sistemática de Literatura (RSL), as soluções de *software* para logística reversa de REEE existentes;
- Desenvolver uma plataforma *web* com participação eletrônica voltada ao descarte de REEE no contexto do município de Arapiraca-AL;

- Validar a usabilidade e a utilidade da solução de *software* proposta junto aos cidadãos de Arapiraca e aos gestores do COMDEMA.

1.3 JUSTIFICATIVA

Impulsionados pelos avanços tecnológicos, os equipamentos eletroeletrônicos tornam-se cada vez mais obsoletos, resultando em um aumento exponencial da eliminação destes resíduos em todo o mundo. Esta questão é singularmente inquietante devido aos impactos ambientais e de saúde pública do descarte inadequado desses materiais, visto que a rapidez com que novos produtos são lançados acelera a obsolescência de modelos anteriores, gerando um fluxo de resíduos que desafia a capacidade de gestão dos municípios.

No contexto de Arapiraca-AL, a falta de infraestrutura adequada e a legislação municipal incipiente sobre as práticas ambientais destacam a urgência de investigar a situação em profundidade. Esta pesquisa visa contribuir com conhecimentos técnico-científicos relacionados à gestão do REEE, fornecendo *insights* sobre o comportamento das pessoas e os padrões de descarte. Ao investigar o cumprimento das práticas de descarte em uma cidade de médio porte em crescimento, o estudo permite descortinar fatores que influenciam as escolhas da população, auxiliando na construção de modelos teóricos. Essa necessidade de integração entre planos municipais e a participação ativa da sociedade é corroborada por Jacobi e Besen (2011), que apontam a carência de infraestrutura local como um dos principais gargalos para a sustentabilidade urbana.

Além disso, a investigação pode evidenciar lacunas na eficácia das políticas públicas existentes, conduzindo a melhorias nas estratégias de gestão de resíduos e ao aprimoramento nos serviços relacionados a esses resíduos especiais. A pesquisa propõe-se a colaborar com a solução de um problema contemporâneo: o descarte inadequado de equipamentos no fim de seu ciclo de vida. Em Arapiraca-AL, assim como em muitas outras cidades brasileiras, enfrenta-se o desafio de evitar a poluição ambiental e os danos à saúde pública, objetivo este que está alinhado às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010), que preconiza a responsabilidade compartilhada e a logística reversa como pilares da gestão sustentável.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada de forma a proporcionar uma compreensão abrangente do escopo investigativo. O capítulo introdutório apresenta uma visão geral dos principais aspectos da pesquisa, contemplando a contextualização temática, a formulação do problema de pesquisa, os objetivos delineados, a fundamentação teórica e a justificativa da relevância científica e social do estudo. Além disso, delimita-se o campo de investigação e expõe-se a organização metodológica e estrutural do trabalho.

O segundo capítulo apresenta a base conceitual que sustenta a investigação, abordando os impactos socioambientais associados aos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos, com ênfase nas práticas voltadas ao descarte ambientalmente adequado desses materiais. São discutidas as estratégias de gestão aplicadas à manipulação e destinação de REEE, incluindo os princípios e instrumentos da logística reversa, bem como o papel da participação eletrônica (*e-participation*) como mecanismo de engajamento social e aprimoramento das políticas públicas voltadas à sustentabilidade no contexto da gestão desses resíduos.

Na sequência, a dissertação organiza-se em dois capítulos adicionais, cada um estruturado no formato de artigo científico destinado à publicação. Esses capítulos contemplam os elementos tradicionais da produção acadêmica, incluindo título, autoria, filiação institucional, resumo, palavras-chave, introdução, procedimentos metodológicos, apresentação e análise dos resultados, considerações finais e referências bibliográficas.

O Artigo 1 apresenta uma RSL, cujo objetivo é mapear as soluções de *software* voltadas à logística reversa de REEE, identificando abordagens consolidadas, funcionalidades recorrentes e lacunas ainda existentes no corpo teórico. Já o Artigo 2 descreve o processo de desenvolvimento de um artefato digital utilizando a *Design Science Research Methodology (DSRM)*, com foco na promoção da participação eletrônica como estratégia para fomentar o descarte ambientalmente adequado de REEE. Esse segundo artigo contempla a prototipação inicial do artefato com base nos dados oriundos da RSL e do campo empírico.

As conclusões gerais decorrentes dos dois estudos apresentados nos artigos que compõem esta dissertação, sintetizando os principais achados e contribuições da pesquisa, estão na seção 8. Além disso, são indicadas possibilidades para investigações futuras, com base nas lacunas identificadas ao longo do trabalho. Por fim, apresentam-se as referências

bibliográficas que fundamentaram a elaboração do estudo, seguidas dos apêndices que complementam a análise desenvolvida.

2 REFERENCIAL CONCEITUAL

Este capítulo expõe o referencial conceitual que fundamenta a presente investigação, servindo de alicerce para a definição dos procedimentos metodológicos e a seleção dos instrumentos utilizados na coleta de dados.

2.1 RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE)

A presença da tecnologia em nosso cotidiano tem, inevitavelmente, impulsionado a produção e o consumo exponencial de EEE, que, por sua vez, acarreta a geração massiva de REEE. Este fluxo de resíduos apresenta uma complexidade singular e contemporânea que tem se tornado uma preocupação crescente em escala global.

Ao analisar-se a literatura pertinente, percebe-se que a definição e a tipologia dos REEE são temas de amplo debate na academia, com pesquisadores optando por classificações alinhadas à legislação de referência da Diretiva *WEEE* da União Europeia. Deve-se ponderar que essa dependência da legislação europeia às vezes restringe a categorização de novos equipamentos ou de resíduos que fogem das tipologias tradicionais. Por isso, a heterogeneidade da composição dos REEE é um ponto crítico, como destacam Baldé *et al.* (2017) e Forti *et al.* (2020). Esses autores evidenciam que esses resíduos contêm não apenas metais preciosos de alto valor econômico, mas, também, substâncias perigosas para a saúde humana, como chumbo, cádmio e mercúrio. É essa dualidade que torna a gestão dos REEE delicada, pois a recuperação de recursos valiosos coexiste com a necessidade imperativa de mitigar impactos ambientais e proteger a saúde humana, caso esses resíduos não sejam gerenciados de forma adequada.

No Brasil, a PNRS, estabelecida pela Lei Federal nº 12.305/2010, representou um avanço ao instituir o princípio da responsabilidade compartilhada, que teoricamente distribui os encargos do ciclo de vida dos produtos. Paralelamente, a Diretiva *WEEE* da União Europeia é frequentemente citada como um marco regulatório avançado. Contudo, como apontam estudos comparativos de autores como Khetriwal *et al.* (2009) e D'Amato *et al.*

(2018), a mera existência de uma legislação não garante sua eficácia. A implementação e a fiscalização emergem como grandes desafios, especialmente em países em desenvolvimento, onde a informalidade na coleta e no processamento persiste como uma barreira significativa. Essa realidade, somada ao baixo conhecimento da população sobre o descarte correto, revela uma lacuna notável entre a intenção legislativa e a realidade operacional. Nesse sentido, Ma *et al.* (2017) argumentam que a ausência de sistemas de coleta acessíveis e a desinformação dos usuários neutralizam a eficácia das políticas públicas, impedindo que a disposição correta dos resíduos ocorra de forma sistemática. Ainda assim, é promissor observar que a literatura atualmente aponta para tendências globais como a economia circular, que buscam diminuir a geração de REEE na fonte. Tais abordagens, embora ainda em estágios iniciais, representam uma mudança de paradigma que pode, no futuro, reduzir a pressão sobre os sistemas de gestão de resíduos.

2.1.2 Descarte ambientalmente adequado de reee

A ineficácia persistente na gestão dos REEE tem intensificado a busca por soluções que assegurem um descarte ambientalmente adequado. Este conceito, central na literatura técnica e legal, refere-se a um processo que visa minimizar os riscos ambientais e à saúde, priorizando, de forma hierárquica, a reutilização, a reciclagem e, por fim, a destinação final segura. Nesse contexto, a logística reversa emerge como o principal instrumento operacional para viabilizar o descarte adequado, tornando-se um tema recorrente e central nas publicações científicas. A partir de uma abordagem crítica, Demajorovic *et al.* (2016) aprofundam a compreensão sobre a estrutura da logística reversa de REEE, contribuindo para o delineamento de modelos mais eficazes de gestão, trazendo à tona o papel fundamental de cada elo da cadeia formada por consumidores, fabricantes/importadores e o poder público.

A grande questão reside justamente na operacionalização da responsabilidade compartilhada, conforme prevista na PNRS. As obrigações dos fabricantes, por exemplo, são teoricamente pautadas na responsabilidade estendida do produtor, enquanto a infraestrutura de pontos de coleta e a educação ambiental são, muitas vezes, delegadas ao poder público. No entanto, a literatura aponta lacunas significativas nestes dois pontos. A baixa adesão dos consumidores é um sintoma da falta de conscientização e da escassez de pontos de coleta acessíveis, um problema particularmente agravado em áreas rurais ou pequenas e médias cidades brasileiras, tais como Arapiraca-AL, que é o lócus da presente pesquisa.

2.2 PARTICIPAÇÃO ELETRÔNICA (*E-PARTICIPATION*)

A participação eletrônica ou *e-participation* tem se consolidado como uma ferramenta promissora para o fortalecimento da governança ambiental e a superação dos desafios inerentes à gestão de resíduos sólidos. A literatura define *e-participation* como o uso estratégico de Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) para engajar cidadãos nos processos de formulação e implementação de políticas públicas. As contribuições de Wang *et al.* (2020) e Okeke-Uzodike & Dlamini (2019) destacam-se por oferecerem *frameworks* teóricos voltados à categorização da *e-participation*, fornecendo bases conceituais para estudos aplicados e análises comparativas em diferentes níveis de engajamento, os quais variam desde a simples comunicação de informações até a tomada de decisão colaborativa. Pode-se observar, no entanto, que a eficácia dessa participação depende diretamente da qualidade da plataforma tecnológica e da real abertura do poder público para incorporar o *feedback* cidadão de forma significativa.

A convergência entre gestão de REEE, descarte adequado e *e-participation* emerge como um campo de pesquisa inovador e de grande potencial. Embora a literatura sobre e-governança e participação cívica seja vasta, observa-se uma lacuna considerável no que diz respeito à aplicação específica dessas ferramentas em um fluxo de resíduos tão complexo quanto os REEE. Essa é uma oportunidade de pesquisa atual, pois a *e-participation* pode, de fato, contribuir para o descarte adequado por meio de uma variedade de plataformas e ferramentas digitais. Como exemplo, os aplicativos móveis não se limitam a apenas informar a geolocalização de pontos de coleta, podendo se tornar centrais para monitorar o fluxo de resíduos e fornecer *feedback* em tempo real.

Da mesma forma, campanhas de conscientização *online* podem ser mais segmentadas e interativas, enquanto plataformas de *crowdsourcing* podem coletar dados valiosos sobre a geração e disposição de REEE diretamente dos cidadãos, fornecendo dados essenciais para políticas públicas mais eficazes, conforme destacam Wang *et al.* (2020). A literatura, portanto, sinaliza que a combinação de tecnologia e engajamento social tem o potencial de ser uma estratégia extremamente eficaz para aumentar a adesão dos cidadãos aos programas de logística reversa, superando as barreiras de conhecimento e de acesso. A grande questão a ser explorada, então, é como traduzir esse potencial tecnológico em resultados práticos e

mensuráveis para a gestão de REEE no contexto de uma cidade de médio porte, tal como Arapiraca-AL.

2.2.1 Exclusão digital

A implementação de soluções de *e-participation* pressupõe que a cidadania digital seja exercida de forma plena, consolidando-se como um mecanismo promissor para a governança ambiental. No entanto, a exclusão digital emerge como um obstáculo crítico que pode comprometer a representatividade e a eficácia da logística reversa colaborativa. A literatura aponta que a exclusão não se limita apenas à ausência de infraestrutura física de acesso à *internet*, mas estende-se à falta de letramento digital, impedindo que cidadãos operem ferramentas tecnológicas com competência e confiança (Maciel *et al.*, 2019). Essa barreira de conhecimento é corroborada por Galegale *et al.* (2018), que argumentam que plataformas de negócios para a logística reversa precisam conectar eficientemente consumidores e recicladores; se a *interface* exigir um nível de conhecimento técnico elevado, a adesão da comunidade será baixa, comprometendo a eficácia do sistema.

No contexto específico de Alagoas, dados recentes da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua (PNAD Contínua), citados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), indicam que, em 2024, o acesso à *internet* alcançou cerca de 91,7% dos domicílios permanentes. Embora este índice sinalize uma quase universalização, a Região Nordeste ainda apresenta as taxas mais baixas de conexão do país (91,3%), e uma disparidade técnica relevante: o uso de banda larga fixa nos domicílios subiu para 94%, enquanto o uso exclusivo de banda larga móvel caiu para 66,1% (IBGE, 2025).

Esses dados dialogam diretamente com os desafios apontados por Bernardo *et al.* (2020), que ressaltam que, em países em desenvolvimento, a infraestrutura tecnológica deficiente retarda a integração efetiva entre os atores da cadeia de suprimentos. Para a solução *AraREEE*, que depende do envio de denúncias em tempo real realizadas nas ruas, longe de redes *wi-fi* domésticas, a dependência de dados móveis de qualidade é um fator determinante. A limitação de franquias de dados pode desincentivar o cidadão a utilizar o aplicativo para o bem comum em detrimento do uso pessoal, confirmando a necessidade de ferramentas que considerem as limitações de infraestrutura local.

Portanto, para mitigar o risco de que a ferramenta atenda apenas a uma parcela da população, a arquitetura da solução deve priorizar *interfaces* intuitivas e leves, que consumam o mínimo de dados possível, alinhando-se à visão de Franco *et al.* (2023) sobre o uso de aplicativos móveis como propulsores de informação acessíveis. Além disso, a estratégia de *e-participation* no município deve ser híbrida, conforme sugerido pela análise de políticas públicas de Oliveira (2023), que destaca a ineficiência de ações que não investem na educação da população. A solução tecnológica deve, assim, ser acompanhada de ações de educação ambiental presenciais e pontos de apoio físicos (como os próprios ecopontos ou PEVs), onde cidadãos com menor letramento tecnológico possam receber auxílio para realizar agendamentos e denúncias, garantindo que a tecnologia atue como ponte, e não como barreira, para a sustentabilidade urbana.

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo descreve o percurso metodológico da presente investigação, servindo como estrutura para a definição dos procedimentos adotados no campo empírico. Tais procedimentos conferem legitimidade e rigor científico ao estudo, assegurando sua aderência às exigências de reprodutibilidade, verificabilidade empírica e conformidade com os marcos éticos e metodológicos que regem a pesquisa acadêmica.

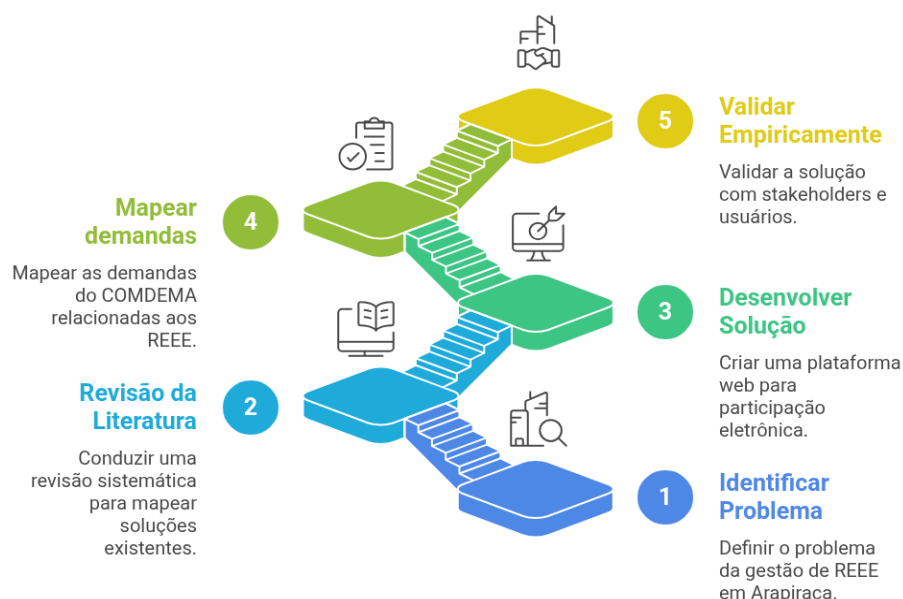
Ao longo do percurso metodológico, fez-se uso de tecnologias de Inteligência Artificial (IA). Destaca-se que tais ferramentas foram empregadas exclusivamente como instrumentos de apoio às atividades de organização, sistematização e refinamento textual, não substituindo, em nenhum momento, o julgamento crítico, a análise interpretativa ou as decisões científicas. O uso da IA observou princípios éticos fundamentais, como transparência, responsabilidade e integridade acadêmica, assegurando que todo o conteúdo produzido, selecionado e validado estivesse em conformidade com os objetivos da pesquisa e com as normas metodológicas vigentes.

3.1 DESENHO DA PESQUISA

A investigação adotou uma abordagem descritiva e mista (qualitativa-quantitativa), fundamentada no método *Design Science Research Methodology (DSRM)*. Esta escolha

justifica-se pela adequação do método à criação e avaliação de artefatos voltados à resolução de problemas, oferecendo uma estrutura rigorosa para compreender desafios e explorar oportunidades em cenários dinâmicos. A pesquisa foi conduzida em cinco etapas distintas, conforme a Figura 1.

Figura 1 – Etapas da investigação.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

A primeira etapa consistiu na identificação e delimitação do problema de pesquisa, sendo fundamental para justificar a necessidade do artefato desenvolvido. Neste estudo, o problema emergiu da crescente geração de REEE no contexto urbano e da baixa efetividade das estratégias públicas de logística reversa em nível municipal, especialmente no que tange à participação cidadã nos processos de descarte ambientalmente adequado. Apesar da existência de marcos legais, como a PNRS, observou-se um distanciamento entre as diretrizes normativas e a realidade operacional dos municípios de médio porte, como Arapiraca-AL. A ausência de ferramentas digitais que articulem o fluxo de informação entre a população, os gestores públicos e os pontos de coleta de REEE dificulta a operacionalização da logística reversa e compromete a sustentabilidade ambiental e a saúde pública. Diante desse cenário, identificou-se a necessidade de propor uma solução tecnológica que promova a participação eletrônica da sociedade civil no processo de gestão dos REEE, com foco na ampliação do acesso à informação, na mobilização social e na otimização dos fluxos logísticos de descarte. Essa necessidade orientou todas as etapas subsequentes da investigação, justificando a adoção de um método construtivista e intervencionista, centrado no desenvolvimento e validação de

um artefato tecnológico como resposta prática e científica ao problema identificado, tal como preceitua a abordagem *DSRM*.

Já a segunda etapa da pesquisa consistiu em executar um protocolo de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para mapear soluções de *software* de logística reversa de REEE, identificando as finalidades e funcionalidades dessas soluções, bem como verificar se elas integravam mecanismos de participação eletrônica. O fenômeno da participação eletrônica, que é fundamentalmente facilitado pelo advento da governança eletrônica, serve como um mecanismo para envolver ativamente a população em questões cívicas e promover uma cultura de transparência em relação às decisões. No contexto específico do município de Arapiraca-AL, a implantação estratégica de plataformas digitais tem o potencial de melhorar significativamente a acessibilidade de informações abrangentes sobre os métodos apropriados de descarte de REEE, promovendo e permitindo uma interação direta e significativa entre os cidadãos, agências governamentais e as entidades responsáveis pelas práticas de gestão de resíduos. No campo da gestão de REEE, a democracia digital apresenta o potencial de transformar os processos de participação social, criando canais de comunicação contínuos e fortalecendo a consulta pública (Wang *et al.*, 2020; Okeke-Uzodike & Dlamini, 2019). Uma solução de *software* desenvolvida com o propósito de fomentar a participação eletrônica pode oferecer maior inclusão na governança local, permitindo que os cidadãos contribuam ativamente com o monitoramento de atividades relacionadas ao descarte de REEE e campanhas educativas de conscientização ambiental (Demajorovic *et al.*, 2016). Além disso, essas soluções tecnológicas reforçam o controle sobre o ciclo de vida dos produtos eletroeletrônicos, impulsionando iniciativas de sustentabilidade em nível municipal. A implementação de ferramentas digitais dessa natureza não apenas amplia o engajamento da comunidade, mas também assegura que as contribuições sociais sejam consideradas no processo decisório, promovendo práticas mais sustentáveis e alinhadas às demandas locais.

A etapa 3 da pesquisa, por sua vez, envolveu o planejamento e desenvolvimento da solução de *software* participativa através da qual os usuários podem indicar os pontos de coleta onde o descarte foi feito irregularmente, além de ajudar as pessoas em relação à destinação correta desse resíduo, incluindo a apresentação de um mapa com os pontos de coleta cadastrados. A solução de *software* proposta para desenvolvimento consiste em uma plataforma *web* projetada para ser acessível tanto à população de Arapiraca-AL quanto aos gestores públicos responsáveis pela supervisão das operações municipais. Seu objetivo principal é facilitar a participação eletrônica no descarte ambientalmente responsável de

resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. A escolha de uma plataforma *web* foi estratégica, pois oferece ampla acessibilidade e facilidade de uso, permitindo que qualquer cidadão com acesso à *internet*, seja por dispositivos móveis ou computadores, participe ativamente do processo, promovendo uma cultura de responsabilidade ambiental. Essa plataforma fornece aos cidadãos ferramentas para localizar pontos de coleta de REEE, acessar orientações detalhadas sobre descarte correto e registrar entregas de resíduos. Paralelamente, gestores públicos têm acesso a dados em tempo real sobre o fluxo de resíduos, facilitando o planejamento estratégico de campanhas de conscientização voltadas à educação ambiental. Entre suas funcionalidades, destacam-se formulários eletrônicos para coleta de dados e mapas interativos para identificação de pontos de coleta. Espera-se que a implementação dessa solução tecnológica não apenas modernize o descarte de REEE em Arapiraca, mas também promova maior transparência e engajamento social nos processos de tomada de decisão, contribuindo para uma gestão ambiental mais eficiente e sustentável.

A etapa 4 concentrou-se em uma pesquisa observacional no campo empírico no ambiente do Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente de Arapiraca-AL (COMDEMA) para que pudessem ser observadas de forma não participativa as pautas deste conselho quanto ao tratamento de REEE e mapear as necessidades relacionadas ao escopo deste estudo, possibilitando, assim, uma análise de conteúdo para identificar padrões, temas emergentes, *insights* significativos e percepção sobre a tecnologia a ser desenvolvida. O COMDEMA exerce um papel essencial no desenvolvimento e na avaliação contínua de políticas ambientais em Arapiraca-AL. Sua atuação configura-se como um agente social central para o engajamento da população e para a supervisão da gestão dos recursos ambientais. Esse papel é fortalecido pela capacidade do conselho de coordenar esforços entre órgãos governamentais, sociedade civil e organizações privadas, promovendo processos colaborativos de tomada de decisão que refletem os princípios da sustentabilidade. No contexto específico da gestão de REEE, o COMDEMA deve atuar como um intermediário fundamental, capaz de alinhar as demandas e preocupações da população às políticas públicas. Por meio de uma abordagem integrada, o COMDEMA não apenas amplifica o engajamento comunitário, mas também contribui para a formulação de estratégias de gestão ambiental. Essas estratégias buscam enfrentar os desafios e alcançar metas futuras de sustentabilidade, reforçando a importância de práticas ambientais responsáveis no contexto local.

Já a etapa final da pesquisa envolveu a validação do artefato desenvolvido (AraREEE), estruturada como uma implementação piloto. Esta fase teve como objetivo mensurar tanto a usabilidade da *interface* móvel (visão do cidadão) quanto a utilidade do painel de gestão (visão dos gestores/COMDEMA). O protocolo de validação foi dividido em dois momentos distintos:

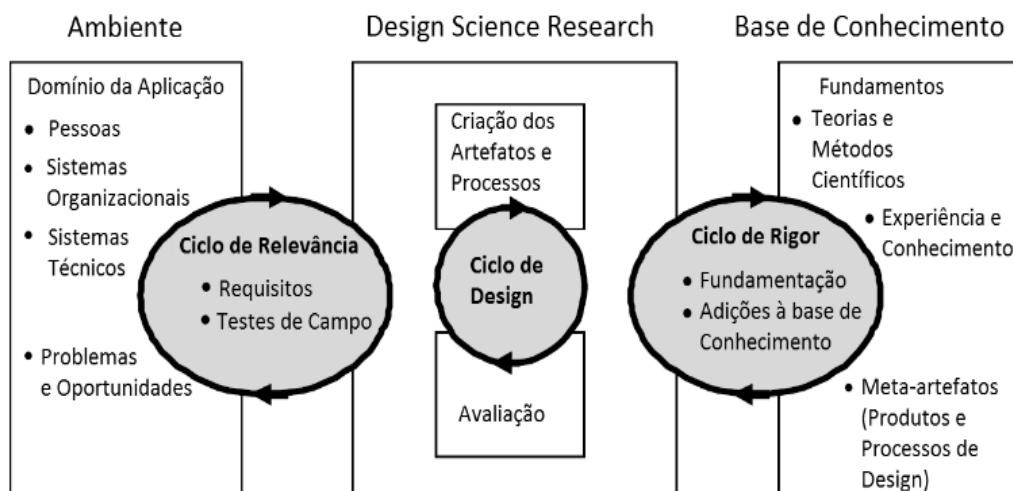
1. **Avaliação de Usabilidade com Usuários Cidadãos:** Foram realizados testes baseados em tarefas (*task-based testing*). Os participantes executaram ações no aplicativo, tais como: localizar o ecoponto, realizar o cadastro de usuário e simular o agendamento de uma coleta. Após a interação, foi aplicado o questionário *SUS* (*System Usability Scale*), uma ferramenta padronizada e amplamente aceita na literatura para quantificar a percepção de facilidade de uso do sistema.
2. **Validação de Utilidade com Especialistas (COMDEMA):** Para validar o módulo gerencial (*Dashboard*), foi realizada uma consulta a 3 (três) membros do COMDEMA. O objetivo foi verificar se os relatórios e métricas gerados pelo *Google Looker Studio* atendem às necessidades de informação para a tomada de decisão sobre logística reversa no município.

Os dados coletados, *score* do SUS e *feedback* qualitativo dos gestores foram triangulados para determinar se o artefato atendia aos requisitos funcionais e não funcionais propostos, permitindo ajustes finais no protótipo antes da entrega do Produto Técnico Tecnológico.

3.2 DESIGN SCIENCE RESEARCH METHODOLOGY (DSRM)

A *DSRM* constitui uma abordagem metodológica estruturada que visa à construção e avaliação de artefatos com a finalidade de resolver problemas práticos relevantes, ao mesmo tempo em que contribui para o avanço do conhecimento científico (Peppers *et al.*, 2007). Com raízes na engenharia, ciência da computação e ciências organizacionais, o método adota uma postura construtivista de intervenção no mundo real, baseada no desenvolvimento iterativo de soluções inovadoras e validadas empiricamente, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Fluxo das etapas da *DSRM*.



Fonte: Baseado em Pimentel *et al.*, 2018.

A metodologia proposta por Peffers *et al.* (2007) organiza o processo de pesquisa em seis etapas principais: (1) identificação do problema e motivação; (2) definição dos objetivos da solução; (3) *design* e desenvolvimento do artefato; (4) demonstração da utilidade do artefato; (5) avaliação de seu desempenho; e (6) comunicação dos resultados. Essa estrutura orienta o pesquisador desde a formulação do problema até a validação científica do artefato, assegurando coerência entre a fundamentação teórica, o desenvolvimento técnico e a aplicabilidade prática da solução concebida.

No contexto da presente pesquisa, a *DSRM* foi adotada por sua capacidade de articular rigor metodológico e relevância prática na criação de um artefato digital voltado à promoção da participação eletrônica (*e-participation*) no descarte ambientalmente adequado de REEE. Essa abordagem permitiu não apenas propor uma solução tecnológica para o problema identificado, mas também gerar conhecimento científico a partir da análise dos processos de desenvolvimento, uso e avaliação do sistema (Figura 3).

Figura 3 – Etapas da Metodologia de Pesquisa.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

As etapas da *DSRM* foram adaptadas à realidade do presente estudo, sendo reestruturadas da seguinte forma: (1) Identificação e delimitação do problema de pesquisa; (2) Revisão Sistemática da Literatura (RSL) para mapeamento de soluções de *software* relacionadas à logística reversa de REEE; (3) Desenvolvimento do artefato digital com base nos princípios da *e-participation*; e (4) Validação empírica do artefato, considerando a aplicabilidade prática no contexto municipal.

Essa aplicação da *DSRM* garante uma abordagem metodológica robusta e alinhada aos objetivos da pesquisa, permitindo que a solução desenvolvida seja tecnicamente consistente, socialmente relevante e cientificamente validada.

3.3 DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DA SOLUÇÃO DE *E-PARTICIPATION*

O desenvolvimento tecnológico do artefato, composto por um aplicativo móvel e um painel de controle (*dashboard*) de dados, não se configura como um fim em si mesmo, mas como o meio pelo qual a pesquisa buscou intervir e gerar conhecimento, tal como preceitua a abordagem *DSRM*.

Assim, inspirado na *DSRM*, o processo de construção do artefato foi uma etapa de *design* e desenvolvimento (fase 3), que culminou na avaliação (fase 4). O objetivo foi

produzir uma solução tecnológica que fosse não apenas funcional, mas também relevante, útil e aceitável para os usuários, alinhando a arquitetura do sistema às necessidades do problema.

A arquitetura da solução foi concebida sob uma abordagem de desenvolvimento *full-stack*, que integra o *frontend*, o *backend* e o banco de dados. Essa escolha se justifica pela necessidade de garantir a coesão entre os componentes e a escalabilidade do sistema, que são:

- **Frontend (Aplicativo Móvel):** A interface de usuário para os cidadãos, um componente crítico para a aceitação da solução, foi desenvolvida utilizando uma plataforma de desenvolvimento de aplicativos de baixo código (*low-code*), o *Kodular*. A adoção dessa plataforma de programação em blocos se justifica pela necessidade de prototipar rapidamente a solução, focando na lógica e nas funcionalidades de *e-participation*, em vez de na complexidade de sintaxe de linguagens de programação tradicionais. Essa abordagem permitiu que o desenvolvimento do artefato se desse de forma ágil e que a pesquisa se concentrasse na validação do conceito e da utilidade da solução com os usuários, garantindo que o *design* da interação fosse intuitivo e direto, tornando a participação o mais acessível possível para a população de Arapiraca.
- **Backend (Banco de Dados):** O gerenciamento de usuários e o armazenamento de dados são totalmente gerenciados pela plataforma *Firebase Google*. A escolha por essa solução de *Backend-as-a-Service (BaaS)* é estratégica, pois simplifica o desenvolvimento da infraestrutura, permitindo que a pesquisa se concentrasse na prototipagem e na validação do artefato, em vez da complexidade de gerenciar servidores. O *Realtime Database* do *Firebase* é particularmente adequado para esta pesquisa, pois permite a sincronização de dados em tempo real, uma funcionalidade essencial para os *dashboards* dos gestores e para o aplicativo móvel.
- **Dashboard de Dados:** O painel de controle, direcionado aos gestores públicos, é uma aplicação *web* interativa. O desenvolvimento foi feito com o *Google Looker Studio*, que permite a construção de interfaces ricas em dados e visualizações dinâmicas. O *dashboard* tem funcionalidades como a visualização em tempo real dos dados de descarte, de denúncias e métricas de participação, permitindo que os gestores tomem decisões baseadas em evidências, em consonância com a governança baseada em dados.

- **Design Centrado no Usuário:** A concepção do artefato foi conduzida sob os princípios do *Design Thinking* e do *User-Centered Design*. As fases iniciais incluíram o mapeamento da jornada do usuário, garantindo que o *design* da solução fosse focado nas necessidades e nos desafios reais dos cidadãos e gestores de Arapiraca.
- **Testes de Usabilidade e Coleta de *Feedback*:** A validação formal da solução foi realizada através de testes *System Usability Scale (SUS)*, que é uma ferramenta padrão e excelente para validar a usabilidade. Estes testes, conduzidos na fase de avaliação da *DSRM*, envolveram a observação de usuários reais executando tarefas no aplicativo.

O processo de desenvolvimento esteve intrinsecamente ligado à validação, pois, diferentemente de uma pesquisa puramente teórica, a *DSRM* exige que o artefato seja avaliado em seu contexto de uso.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASILEIRA DE DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL – ABDI. **Logística reversa de equipamentos eletroeletrônicos: análise de viabilidade técnica e econômica.**

Brasília: ABDI, 2013.

BALDÉ, C. P.; FORTI, V.; GRAY, V.; KUEHR, R.; STEGMANN, P. **Observatório mundial de resíduos eletrônicos 2017.** Universidade das Nações Unidas (UNU), União Internacional de Telecomunicações (UIT) e Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA), Bonn/Ginebra/Viena, 2017. Disponível em: <https://globalewaste.org/wp-content/uploads/2018/10/Global-E-waste-Monitor-2017.pdf>. Acesso em: 09 jun. 2025.

BERNARDO, O. O.; SOUZA, M. T. S. de; DEMAJOROVIC, J. **Inovação na cadeia reversa de resíduos eletroeletrônicos: um estudo sobre os sistemas de informação e as tecnologias de rastreamento.** RAE – Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 60, n. 4, p. 248-261, jul./ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-759020200402>.

BEULA, D.; SURESHKUMAR, M. **A review on the toxic E-waste killing health and environment – Today's global scenario.** Materials Today: Proceedings, v. 47, p. 2168–2174, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.05.516.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Decreto nº 10.240, de 12 de fevereiro de 2020.** Regulamenta o inciso VI do caput do art. 33 e o art. 56 da Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, e complementa o Decreto nº 9.177, de 23 de outubro de 2017, quanto à implementação do sistema de logística reversa de produtos eletroeletrônicos e seus componentes de uso doméstico. Brasília, 2020.

CARVALHO, T. C. M. B.; XAVIER, L. H. **Gestão de resíduos eletroeletrônicos: uma abordagem prática para a sustentabilidade.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. p. 149–164.

D'AMATO, A.; MAZZANTI, M.; NICOLLI, F.; ZOLI, M. **Illegal waste disposal: enforcement actions and decentralised environmental policy**. Socio-Economic Planning Sciences, v. 64, p. 56-65, 2018. DOI: 10.1016/j.seps.2017.12.006.

DEMAJOROVIC, J.; AUGUSTO, E.; SOUZA, M. T. **Logística reversa de REEE em países em desenvolvimento: desafios e perspectivas para o modelo brasileiro**. Ambiente & Sociedade, v. 19, n. 2, p. 117-136, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC141545V1922016>.

DIRETIVA 2012. **Diretiva 2012/19/EU do Parlamento Europeu e do Conselho**, de 4 de julho de 2012, relativa aos resíduos de equipamentos elétrico e eletrônicos (REEE). Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019&from=en>. Acesso em: 10 jun. 2025.

FAVERO, S.; CLODOALDO, I.; LUGARESI, M.; NOTARI, D. L.; ÁVILA, S. S. E. **Resíduos eletroeletrônicos: uma revisão sistemática da literatura**. Revista Interdisciplinar de Ciência Aplicada, v. 4, n. 7, 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) – SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU), International Solid Waste Association (ISWA), 2020.

FRANCO, A. S.; MOREIRA, C. S.; LIMA, J. C.; SILVA, J. C.; NASCIMENTO, V. X.; MIRANDA, P. R. B.; CABRAL, A. B. **Uso de aplicativos na educação ambiental como ferramenta para conscientização no descarte correto do lixo eletrônico**. Diversitas Journal, v. 8, n. 2, p. 771-787, abr./jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v8i2.2121>.

GALEALE, N. V.; PRADO, O. A.; TOKANO, M.; CORTES, P. L. **Plataforma multilateral de negócios para a logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. In: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA), 20., 2018, São Paulo. São Paulo: ENGEMA, 2018. ISSN 2359-1048.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002. ISBN: 85-224-3169-8.

GREEN ELETRON. **Resíduos eletrônicos no Brasil – 2021**. Disponível em: https://greeneletron.org.br/download/RELATORIO_DE_DADOS.pdf. Acesso em: 09 jun. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Sistema IBGE de Recuperação Automática – SIDRA. Estimativas de População – 2020**. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/pesquisa/estimapop/tabelas>. Acesso em: 10 jun. 2025.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **PNAD Contínua TIC 2024: Acesso à internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/44031-internet-chega-a-74-9-milhoes-de-domicilios-do-pais-em-2024>. Acesso em: 10 jun. 2025.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade**. Estudos Avançados, v. 25, n. 71, p. 135-158, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-40142011000100010>.

KHETRIWAL, D. S.; KRAEUCHI, P.; WIDMER, R. **Producer responsibility for e-waste management: key issues for consideration e learning from the Swiss experience**. Journal of Environmental Management, v. 90, n. 1, p. 153-165, jan. 2009.

MA, L.; SU, X.; WANG, C.; LIN, K.; LIN, M.. **Consumers' intention to purchase remanufactured electronic products: An empirical study in China**. Conferência Internacional sobre Sistemas de Serviços e Gestão de Serviços, ICSSSM. 2017. ISBN eletrônico: 978-1-5090-6370-3. DOI: 10.1109/ICSSSM.2017.7996179.

MACIEL, R. G.; FONSECA, P. G.; DUARTE, F. R.; SANTOS, E. M. dos. **Sistema Eletrônico do Serviço de Informação ao Cidadão (e-SIC) e sua contribuição para a transparência: uma experiência gerencial em uma universidade federal**. Perspectivas em

Ciência da Informação, Belo Horizonte, v. 24, n. 2, p. 143-164, jun. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1981-5344/3824>.

MORAES, C. S. B. de; MARTIRES, G. M. B. M.; BONARETTO, C. M. V.; CAMPOS, M. O. de; ANSANELLI, S. L. de M.; OLIVEIRA, J. A. de; MAIA, J. V. F.; BARBOSA, M. C. dos S. **Gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em municípios do Estado de São Paulo: caracterização e propostas de diretrizes**. Revista Brasileira de Desenvolvimento, v. 7, n. 11, p. 109842–109871, 2021. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-557>.

OKEKE-UZODIKE, O. E.; DLAMINI, B. **Citizens' e-participation at local municipal government in South Africa**. Journal of Reviews on Global Economics, v. 8, p. 458–468, 2019. DOI: <https://doi.org/10.6000/1929-7092.2019.08.39>.

OLIVEIRA, M. S. de. **Educação ambiental como instrumento de política pública: uma análise da gestão do lixo eletrônico na cidade de Belém-PA**. 2023. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local da Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

PEFFERS, K.; ROTHENBERGER, M.; KUECHLER, W. **A design science research methodology for information systems research**. Journal of Management Information Systems, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>.

PIMENTEL, M., FILIPPO, D., SANTORO, F. M. **Design science research: fazendo pesquisas científicas rigorosas atreladas ao desenvolvimento de artefatos computacionais projetados para a educação**. Metodologia de Pesquisa em Informática na Educação: Concepção da Pesquisa. Porto Alegre: SBC. 2020.

POLÍTICA ALAGOANA. **Estudo de 2024 aponta que 1,1 milhão de domicílios em Alagoas têm acesso à internet**. 2025. Disponível em: [https://www.politicaalagoana.com.br/estudo-de-2024-aponta-que-11-milhao-de-domicilios-e-m-alagoas-tem-acesso-a-internet/#:~:text=Em%202024%2C%20aproximadamente%201%2C1%20milh%C3%A3o%20de%20domic%C3%ADlios,Comunica%C3%A7%C3%A3o%20\(TI C\)%20da%20Pesquisa%20Nacional%20por%20Amostra](https://www.politicaalagoana.com.br/estudo-de-2024-aponta-que-11-milhao-de-domicilios-e-m-alagoas-tem-acesso-a-internet/#:~:text=Em%202024%2C%20aproximadamente%201%2C1%20milh%C3%A3o%20de%20domic%C3%ADlios,Comunica%C3%A7%C3%A3o%20(TI C)%20da%20Pesquisa%20Nacional%20por%20Amostra). Acesso em: 10 ago. 2025.

PONTES, F. N.; GIORDANO, F. **Práticas de TI Verde em uma empresa educacional para fomentar a responsabilidade socioambiental**. Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS, v. 4, n. 2, 2015. DOI: 10.5585/geas.v4i2.246.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Lei n. 2.221, de 31 de dezembro de 2001**. Institui o Código Municipal de Meio Ambiente e dispõe sobre a Administração do Uso dos Recursos Ambientais e Ordenação do Uso do Solo do Território do Município de Arapiraca. 2001. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/arquivos/lei-no-2-2212001-institui-o-codigo-municipal-de-mei-o-ambiente-e-dispoe-sobre-administracao-do-uso-dos-recursos-ambientais-e-ordenacao-do-us-o-do-solo-do-territorio-do-municipio-de-arapira/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Decreto n. 2.226, de 14 de fevereiro de 2011**. Regulamenta dispositivos da Lei nº 2.221, de 31 de dezembro de 2001, que institui o Código Municipal de Meio Ambiente e dispõe sobre a Administração do Uso dos Recursos Ambientais e Ordenação do Uso do Solo do Território do Município de Arapiraca. 2011. Disponível em: <https://transparencia.arapiraca.al.gov.br/legislacao/download/1309/1328>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Lei n. 3.040, de 23 de outubro de 2014**. Dispõe sobre o Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente - COMDEMA, revoga as Leis nº 2.128/2000 e 2.493/2007, e dá outras providências correlatas. 2014. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/wp-content/uploads/2019/02/3040.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Lei n. 3.372, de 12 de novembro de 2019**. Dispõe sobre a instituição da Coleta Seletiva e Contínua de Lixo no Município de Arapiraca-Al. Disponível em: <https://transparencia.arapiraca.al.gov.br/legislacao/download/124/125>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Arapiraca incentiva a coleta seletiva com a instalação de 33 Pontos de Entrega Voluntária**. 2020. Disponível em:

<https://web.arapiraca.al.gov.br/2020/09/arapiraca-incentiva-coleta-seletiva-com-instalacao-de-33-pontos-de-entrega-voluntaria/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Coleta ON, Resíduo OFF: Arapiraca lança campanha de coleta de resíduos eletroeletrônicos.** 2021. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/2021/11/coleta-on-residuo-off-arapiraca-lanca-campanha-de-coleta-de-residuos-eletricoeletronicos/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Arapiraca oferece quatro Ecopontos de entregas voluntárias para atendimento da população.** 2023. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/2023/01/arapiraca-oferece-quatros-ecopontos-de-entregas-voluntarias-para-atendimento-da-populacao/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **IBGE: Arapiraca avança e tem um dos maiores PIB per capita do interior do nordeste.** 2023. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/2023/12/ibge-arapiraca-avanca-e-tem-um-dos-maiores-pib-per-capita-do-interior-do-nordeste/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SINIR – SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE A GESTÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS. **Eletroeletrônicos e seus componentes. Ministério do Meio Ambiente,** 2019. Disponível em: <https://sinir.gov.br/component/content/article/2-sem-categoria/474-acordo-setorial-de-eletronicos>. Acesso em: 11 jun. 2025.

WANG, Z.; WANG, Q.; CHEN, B.; WANG, Y. **Evolutionary game analysis on behavioral strategies of multiple stakeholders in E-waste recycling industry.** Resources, Conservation and Recycling, v. 155, 104618, abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104618>.

5 CAPÍTULO I

SOLUÇÕES DE SOFTWARE PARA LOGÍSTICA REVERSA DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS (REEE) COM PARTICIPAÇÃO SOCIAL ELETRÔNICA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA¹

Wisnner Franklin dos Santos Silva

Instituto Federal de Alagoas (IFAL)

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTEC)

RESUMO

Este estudo apresenta uma revisão sistemática sobre soluções de *software* aplicadas à logística reversa de resíduos eletroeletrônicos (REEE), destacando funcionalidades, abordagens tecnológicas e a importância da participação eletrônica cidadã. A pesquisa buscou mapear o panorama das tecnologias digitais voltadas à gestão de REEE, com ênfase na identificação de funcionalidades que promovem o engajamento cidadão e a logística reversa colaborativa. A RSL foi conduzida seguindo o protocolo *PRISMA*, utilizando o *Google Sheets* para organização dos dados. As bases de dados selecionadas foram *Google Scholar*, *Periódicos CAPES* e *SciELO Brasil*. Foram elaboradas *strings* de busca com base em palavras-chave e operadores booleanos. O processo de seleção dos estudos incluiu quatro fases: seleção por título, seleção por resumo, leitura diagonal e leitura completa. Dos 281 estudos inicialmente identificados, 10 foram selecionados para análise integral. A maioria dos estudos (7 de 10 estudos) propõe e analisa soluções tecnológicas para o descarte de REEE, enquanto 5 de 10 estudos focam em iniciativas de participação eletrônica. As soluções tecnológicas visam otimizar a coleta, triagem e retorno dos resíduos à cadeia produtiva, incluindo plataformas digitais e aplicativos móveis. A participação eletrônica busca engajar a população através de ferramentas digitais, tornando o descarte correto mais acessível e conveniente. Conclui-se que a revisão identificou uma tendência crescente no desenvolvimento de soluções de *software* focadas na participação eletrônica (*e-participation*). Os resultados demonstram que, diante da carência de infraestrutura automatizada, as ferramentas digitais que promovem o engajamento cidadão e a educação ambiental emergem como as alternativas mais eficazes para viabilizar a logística reversa de REEE no cenário nacional.

¹ Artigo elaborado seguindo as normas da Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB). Disponível em: <<https://www.rbciamb.com.br/>>. QUALIS CAPES em Ciências Ambientais: A3

PALAVRAS-CHAVES: Logística Reversa; Resíduos Eletroeletrônicos (REEE); Soluções de Software; Participação Eletrônica; Gestão de Resíduos.

5.1 INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos têm desempenhado um papel fundamental na modernização da sociedade, promovendo melhorias significativas em diversos setores e facilitando a vida cotidiana. A constante inovação tem impulsionado o surgimento de dispositivos eletrônicos cada vez mais sofisticados, eficientes e multifuncionais, o que, por sua vez, estimula o consumo acelerado desses produtos, motivado pela busca por melhor desempenho e atualização tecnológica constante (Araújo *et al.*, 2019).

Em países em desenvolvimento, como o Brasil, a estrutura de logística reversa ainda é incipiente e enfrenta grandes desafios operacionais, normativos e tecnológicos. Apesar dos avanços legais, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que estabeleceu diretrizes para a responsabilidade compartilhada, a efetiva implementação de sistemas de coleta e tratamento adequados para Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) é desigual e muitas vezes ineficiente, pois enfrenta obstáculos como a falta de infraestrutura regionalizada e a baixa adesão dos consumidores (Guarnieri *et al.*, 2020).

A logística reversa tem se consolidado, nas últimas décadas, como uma das principais ferramentas para a sustentabilidade e a economia circular, permitindo o retorno de produtos pós-consumo ao ciclo produtivo ou sua destinação ambientalmente adequada. No contexto dos REEE, essa prática torna-se ainda mais relevante devido à natureza complexa e potencialmente perigosa desses materiais, que têm se consolidado como um imperativo ambiental e econômico diante do crescente volume de descarte, estimado em 53,6 milhões de toneladas de REEE em 2019, segundo o *Global E-waste Monitor 2020*, com uma previsão de aumento significativo até 2030. No entanto, menos de 20% desses resíduos são formalmente reciclados.

De acordo com o Fórum Internacional de Resíduos de Equipamentos Elétricos e Eletrônicos, aproximadamente 5,3 bilhões de telefones celulares foram descartados globalmente no ano de 2022 (*WEEE Forum*, 2022). Essa estimativa, fundamentada em dados do comércio internacional, evidencia a magnitude crescente do desafio ambiental representado pelos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos. O volume expressivo de descarte de dispositivos móveis ilustra não apenas o ritmo acelerado da obsolescência

tecnológica, mas também a urgência da adoção de políticas eficazes de gestão e logística reversa para mitigar os impactos socioambientais.

O Brasil, como maior produtor de REEE da América Latina e o quinto do mundo, enfrenta um desequilíbrio crônico entre a geração e o tratamento adequado desses resíduos. Isso evidencia uma lacuna entre os marcos regulatórios e a capacidade institucional de implementar soluções eficazes, como a carência de pontos de coleta, altos custos de transporte e a complexidade na rastreabilidade (Silva *et al.*, 2020).

A indústria, por sua vez, lida com a pressão por conformidade legal e a necessidade de integrar cadeias reversas fragmentadas, muitas vezes dependentes de cooperativas informais (Gonçalves-Dias; Silva, 2019). Além disso, a ausência de dados confiáveis sobre fluxos de resíduos dificulta o planejamento estratégico, perpetuando modelos ineficientes (Nowakowski; Mrówczyńska, 2018). Esses problemas evidenciam a urgência de sistemas inteligentes capazes de otimizar processos e conectar *stakeholders*.

Neste cenário, as soluções de *software* aparecem como alternativas para atender às deficiências estruturais e operacionais da gestão de REEE, colaborando no processo de automatizar e melhorar a logística reversa. Tais soluções variam desde plataformas para rastreabilidade de resíduos, sistemas de monitoramento em tempo real, aplicativos para educação ambiental e engajamento da população, até sistemas corporativos de gestão integrada. Plataformas como *SAP Sustainability Control Tower* utilizam inteligência artificial para integrar dados empresariais e de sustentabilidade, otimizando processos e promovendo decisões informadas em tempo real (SAP, 2025). Na Alemanha, a *GreenTec* oferece serviços de gestão de ativos de TI e reciclagem de resíduos eletrônicos, com foco na segurança e sustentabilidade (Greentec, 2025). No Brasil, o aplicativo *Cataki* conecta catadores de materiais recicláveis a geradores de resíduos, facilitando a logística reversa e promovendo o engajamento comunitário (Julius Baer, 2025). No entanto, a adoção ainda é incipiente em regiões periféricas, onde a exclusão digital e a baixa alfabetização tecnológica limitam a eficácia.

Por outro lado, a participação social eletrônica ou apenas participação eletrônica (*e-participation*) tem se consolidado como um elemento-chave para o sucesso das soluções digitais na gestão de REEE (Moraes *et al.*, 2021). Ao promover o engajamento cidadão por meio de plataformas digitais, aplicativos móveis e redes sociais, amplia-se a consciência ambiental e a efetividade das campanhas de coleta seletiva. Iniciativas como o *E-Waste*

Challenge, promovido pela Universidade das Nações Unidas (UNITAR), utilizam gamificação e estratégias interativas para incentivar a educação ambiental e a participação ativa dos cidadãos na gestão de resíduos eletrônicos. De fato, autores como Moraes *et al.* (2021) demonstram que soluções de *e-participation* podem transformar a relação entre sociedade e poder público, tornando os processos de gestão de resíduos mais participativos, democráticos e eficientes. A inclusão de funcionalidades que permitam aos cidadãos denunciar pontos de descarte irregular, localizar pontos de coleta e acompanhar o destino dos resíduos é fundamental para o êxito de qualquer iniciativa.

A reconfiguração da relação entre sociedade e poder público, rumo a uma governança mais participativa, tem sido impulsionada por inovações tecnológicas que diversificam os canais de diálogo e ação. A literatura categoriza esse movimento em quatro vertentes principais que instrumentalizam a participação cidadã: o uso de aplicativos móveis para interação direta e incentivo ao descarte correto (como o REICLA-E); plataformas *web* que integram a cadeia de gestão, conectando consumidores, empresas e recicladores (a exemplo do REEEcicla); sistemas de rastreabilidade (*IoT*) que garantem transparência; e a gamificação como ferramenta de educação ambiental (como o ARENA REEE).

Contudo, a efetivação dessa nova dinâmica participativa enfrenta desafios estruturais. A literatura aponta que a implementação dessas soluções ainda é fragmentada, carecendo de abordagens que integrem as dimensões tecnológica, social e institucional. Além disso, observa-se uma desigualdade geográfica na aplicação desses modelos, que privilegiam grandes metrópoles e negligenciam as especificidades e necessidades de municípios de médio porte.

Assim, este estudo tem como objetivo investigar, por meio de uma RSL, as soluções de *software* desenvolvidas e/ou implementadas para apoiar a logística reversa de REEE, com especial atenção às funcionalidades oferecidas e à incorporação de mecanismos de participação eletrônica. A justificativa para esta pesquisa fundamenta-se na carência de estudos consolidados que integrem aspectos tecnológicos, ambientais e sociais na análise de tais soluções, revelando lacunas que necessitam ser exploradas para orientar o desenvolvimento de ferramentas mais eficazes e inclusivas.

A estrutura deste artigo está dividida em quatro seções principais. A primeira seção introduz o problema de pesquisa, contextualizando a problemática dos REEE no cenário atual e destacando a importância da tecnologia na promoção de práticas sustentáveis. A segunda

seção apresenta o referencial teórico, no qual são discutidos os conceitos de logística reversa, participação eletrônica e soluções digitais aplicadas à gestão de resíduos eletroeletrônicos. A terceira seção detalha a metodologia da RSL e expõe os principais resultados obtidos, com ênfase nas funcionalidades das soluções de *software* identificadas e nas abordagens tecnológicas predominantes. Por fim, a quarta seção apresenta as considerações finais, destacando as principais contribuições do estudo, as limitações encontradas e recomendações para pesquisas futuras, seguida das referências utilizadas ao longo do trabalho.

5.2 LOGÍSTICA REVERSA E A GESTÃO DE RESÍDUOS ELETROELETRÔNICOS

A logística reversa tem se consolidado como um dos principais pilares da gestão ambiental contemporânea, especialmente no que tange ao reaproveitamento e descarte adequado de resíduos. Segundo Leite (2009), a logística reversa envolve o retorno de produtos e materiais do consumidor final para os elos anteriores da cadeia produtiva, com fins de reaproveitamento, reciclagem ou descarte ambientalmente adequado. Esse processo ganha complexidade significativa quando se trata dos REEE, cuja composição envolve materiais perigosos e valiosos.

No contexto global, a geração de REEE tem crescido exponencialmente, impulsionada pelo consumo acelerado de tecnologia e pela obsolescência programada. De acordo com Baldé *et al.* (2017), o mundo gerou aproximadamente 44,7 milhões de toneladas de REEE em 2016, com previsão de crescimento contínuo. Já no Brasil, a situação é crítica: o país é o maior gerador de lixo eletrônico da América Latina e o quinto no mundo, conforme o *Global E-waste Monitor* (2020), mas com baixíssimos índices de reciclagem e destinação correta.

Os desafios brasileiros incluem não apenas a ausência de infraestrutura adequada para o processamento desses resíduos, mas também a falta de políticas públicas eficazes e o desconhecimento da população quanto às obrigações e possibilidades de descarte correto. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) instituiu a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, mas a implementação ainda encontra entraves consideráveis, principalmente nos municípios.

Nos municípios brasileiros, os principais obstáculos na gestão de REEE envolvem desde a ausência de sistemas estruturados de coleta até a carência de dados para tomada de decisão. Pires e Silva (2017) destacam que, apesar dos avanços legislativos, os municípios

carecem de instrumentos técnicos e financeiros para implementar programas efetivos de logística reversa. A coleta seletiva ainda é restrita a áreas urbanas centrais, e a integração entre o poder público, catadores e empresas privadas é frágil.

Do ponto de vista industrial, o desafio está em integrar a responsabilidade pós-consumo aos processos produtivos de forma economicamente viável. Muitos fabricantes ainda resistem a adotar sistemas de logística reversa por considerarem onerosa a operação. De acordo com Barbieri e Dias (2002), a ausência de incentivos e de uma cultura organizacional voltada à sustentabilidade dificulta a adoção de soluções sistêmicas.

Além disso, a rastreabilidade dos REEE ainda é limitada; em muitas regiões, não se sabe o destino final dos equipamentos descartados, o que inviabiliza o controle e o monitoramento exigidos pelas normas ambientais. Essa realidade reforça a necessidade de ferramentas digitais que promovam maior controle e integração entre os atores envolvidos.

Nesse contexto, soluções de *software* vêm sendo apontadas como ferramentas promissoras para enfrentar os desafios da logística reversa de REEE. Essas tecnologias permitem desde o mapeamento e rastreio de resíduos até a gestão de coletas, interação com usuários e monitoramento de indicadores. Segundo Silva *et al.* (2020), sistemas baseados em *Internet das Coisas (IoT)* e *Big Data* possibilitam maior transparência e eficiência na cadeia de descarte.

Outro conceito em ascensão é a participação eletrônica (*e-participation*), que promove o engajamento da população por meio de ferramentas digitais. Wang *et al.* (2020) complementam ao apontar que a *e-participation*, quando bem estruturada, fortalece a cidadania e contribui para a efetividade das ações governamentais. Além disso, esses sistemas favorecem a coleta de dados primários que podem subsidiar políticas públicas, tendo o potencial de transformar a governança ambiental. Hannan *et al.* (2015) demonstram que sistemas de informação desenvolvidos para gestão de resíduos permitem maior controle por parte dos gestores, facilitam auditorias e promovem a transparência. Entretanto, os estudos também apontam limitações quanto à adoção, principalmente em regiões com baixo acesso digital.

No cenário brasileiro, Moraes *et al.* (2021) destacam que há uma demanda crescente por plataformas participativas que permitam não apenas o registro de denúncias e solicitações, mas também o acompanhamento de ações públicas e o *feedback* dos usuários. Essa

abordagem é essencial em um país onde a confiança institucional ainda é um desafio e o engajamento cívico precisa ser estimulado por meio de meios acessíveis.

5.3 METODOLOGIA

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) foi adotada como abordagem metodológica por se tratar de um procedimento científico rigoroso, estruturado e reproduzível, amplamente utilizado para identificar, avaliar criticamente e sintetizar o conhecimento existente sobre uma temática específica (Okoli, 2015; Kraus *et al.*, 2022). Seu principal objetivo é reunir, de forma transparente, evidências provenientes de estudos primários com características comparáveis, a fim de responder a questões de pesquisa claramente definidas.

Ao consolidar esses dados em um estudo secundário, a RSL permite não apenas o mapeamento do estado da arte, mas também a construção de uma base metodológica sólida que possa ser replicada e ampliada por futuras investigações. Para assegurar a qualidade e a confiabilidade do processo, esta revisão foi conduzida conforme as diretrizes do protocolo *PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)*, reconhecido internacionalmente por orientar a condução e o relato de revisões sistemáticas com excelência metodológica (Liberati *et al.*, 2009; Kraus *et al.*, 2022).

Para a organização dos dados coletados, foi utilizado o *software Google Sheets*, que auxiliou na sistematização, busca e extração das informações provenientes das fontes eletrônicas selecionadas. A realização de uma RSL é motivada por diversos propósitos estratégicos no contexto da pesquisa científica. Entre eles, destacam-se:

- i. A identificação de lacunas no conhecimento disponível, contribuindo para a formulação de direcionamentos e sugestões para investigações futuras;
- ii. O fornecimento de uma base teórica consolidada que sirva como ponto de partida para novos estudos;
- iii. A análise crítica das evidências empíricas existentes, no intuito de verificar se estas corroboram, refutam ou subsidiam a formulação de novas hipóteses.

Dessa forma, a RSL configura-se como uma ferramenta metodológica essencial para o avanço do conhecimento científico, promovendo rigor, reprodutibilidade e profundidade na compreensão dos temas investigados, requerendo a adoção das seguintes etapas:

- **Planejamento:** Formulação das questões de pesquisa de maneira clara e objetiva;
- **Execução:** Realização de uma busca sistemática na literatura científica por estudos primários relevantes, por meio da aplicação de *strings* de busca elaboradas com base em palavras-chave e operadores booleanos;
- **Seleção:** Busca criteriosa dos estudos com base em critérios previamente definidos de inclusão e exclusão;
- **Extração:** Síntese dos dados obtidos nos estudos selecionados, com vistas à consolidação das evidências disponíveis;
- **Sumarização:** Elaboração do artigo científico final, visando à divulgação dos resultados obtidos e à contribuição para o avanço do conhecimento na área.

Esse processo assegura transparência, reprodutibilidade e confiabilidade à pesquisa sistemática. Dessa maneira, a presente revisão sistemática tomou como base três questões norteadoras:

- Q1 - Quais as soluções de *softwares* voltadas ao descarte de REEE?
- Q2 - Quais as funcionalidades das soluções de *softwares* voltadas a logística reversa de REEE?
- Q3 - Como é abordada a participação eletrônica nessas soluções de *softwares*?

Com as questões da pesquisa definidas, foram selecionadas as bases de dados para a realização das buscas. As bases escolhidas foram *Google Scholar*, *Periódicos CAPES* e *SciELO Brasil*. Foram elaboradas *strings* de busca (termos de busca), baseadas nas palavras-chave e seus sinônimos, juntamente com os operadores booleanos – “OR” e “AND”. Vale ressaltar que essas *strings* sofreram pequenas variações para adequar-se às bases de dados. A Tabela 1 apresenta as strings definidas.

Tabela 1 – *Strings* de busca para as questões de pesquisa.

Questão	Base de dados	String de busca
Q1	<i>Google Scholar</i>	(aplicativo OR "soluções de software") AND (coleta OR descarte) AND ("Resíduos eletroeletrônicos" OR REEE) AND ("logística reversa")
	<i>Periódicos CAPES / SciELO Brasil</i>	("software" OR "sistema" OR "plataforma" OR "aplicativo" OR "aplicação") AND ("logística reversa" OR "gestão de resíduos" OR "descarte de eletrônicos" OR "reciclagem de eletrônicos") AND ("REEE" OR "resíduos eletroeletrônicos" OR "e-waste" OR "lixo eletrônico")
Q2	<i>Google Scholar</i>	(aplicativo OR "soluções de software") AND (funcionalidades) AND ("Resíduos eletroeletrônicos" OR REEE) AND ("logística reversa")

Q3	Periódicos CAPES / SciELO Brasil	("Resíduos eletroeletrônicos" OR "REEE") AND (reciclagem OR gerenciamento OR descarte) AND (gestão OR coleta OR "logística reversa") AND (aplicação OR implementação)
	Google Scholar	(aplicativo OR "soluções de software") AND (interação OR participação OR engajamento) AND ("Resíduos eletroeletrônicos" OR REEE) AND ("logística reversa")
	Periódicos CAPES / SciELO Brasil	("Resíduos eletroeletrônicos" OR "REEE") AND (participação) AND (gestão OR coleta OR "logística reversa") AND (aplicação OR implementação)

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

As *strings* de busca implementadas nos bancos de dados foram especificamente escolhidas para este estudo. O processo de seleção consistiu em quatro fases distintas, conforme ilustrado na Figura 3. Para garantir o rigor metodológico e mitigar possíveis vieses de seleção, as etapas de triagem e elegibilidade foram conduzidas por dois revisores. As divergências quanto à inclusão ou exclusão dos estudos foram discutidas e resolvidas por consenso, assegurando a confiabilidade dos dados selecionados. Fases do processo de seleção: seleção com base no título do estudo; seleção com base no resumo; seleção envolvendo uma abordagem de leitura diagonal; leitura completa dos estudos selecionados. Em cada um desses estágios, os critérios predeterminados de inclusão e exclusão, que já haviam sido estabelecidos no protocolo, foram cuidadosamente examinados e levados em consideração.

Figura 3 – Processo de seleção dos estudos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

Inicialmente, foram estabelecidos critérios de elegibilidade rigorosos para a seleção dos estudos incluídos nesta revisão. Foram considerados apenas documentos classificados

como artigos científicos publicados em periódicos revisados por pares, teses de doutorado e dissertações de mestrado devidamente indexadas em bases reconhecidas, com o intuito de garantir a consistência metodológica e a qualidade das evidências analisadas. Foram excluídos capítulos de livros e trabalhos de conclusão de curso de graduação.

Complementando a seleção, estabeleceu-se como critério temporal o intervalo compreendido entre os anos de 2015 a 2025. Tal delimitação visa contemplar as contribuições mais recentes e relevantes sobre o tema, sobretudo considerando os avanços tecnológicos ocorridos na última década e o crescente interesse por soluções digitais aplicadas à logística reversa de REEE. Conforme destacado por Kitchenham *et al.* (2009), a definição de um recorte temporal contribui para a reprodutibilidade da revisão e para a seleção de estudos alinhados ao estado da arte. Adicionalmente, Petticrew e Roberts (2006) ressaltam que o intervalo temporal deve ser compatível com os objetivos da pesquisa, evitando a inclusão de estudos obsoletos ou desalinhados com o contexto atual.

A restrição ao idioma português foi adotada com base na relevância do contexto brasileiro para esta pesquisa, bem como na intenção de mapear a produção científica disponível em língua nacional, frequentemente negligenciada em revisões internacionais, mas essencial para o entendimento das práticas e desafios locais. Kitchenham *et al.* (2009) e Okoli (2015) reconhecem que a restrição linguística é metodologicamente aceitável em revisões sistemáticas, desde que explicitada e justificada, sobretudo quando associada à garantia de correta interpretação dos dados e à qualidade da síntese dos resultados. Tal prática também é recomendada pelo protocolo *PRISMA* (Liberati *et al.*, 2009), que orienta a transparência na definição dos critérios de inclusão e exclusão.

Após a leitura diagonal, estabeleceram-se critérios de qualidade que foram considerados durante a elegibilidade dos estudos, tais como a ausência de aderência ao tema central da pesquisa (soluções de *software* para logística reversa de REEE), o detalhamento da metodologia utilizada para implementação e se o trabalho cita o uso de participação eletrônica dos cidadãos no descarte de REEE.

5.4 RESULTADOS

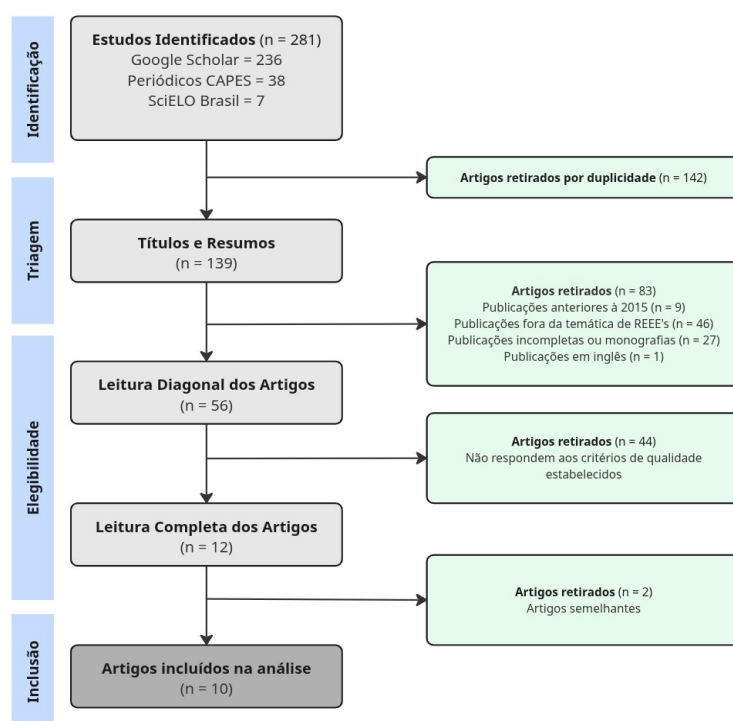
Os 10 (dez) estudos incluídos nesta revisão sistemática possibilitaram uma análise mais estruturada dos resultados; os estudos foram organizados a partir de seus fundamentos

teóricos e motivações declaradas. Embora cada artigo apresente suas características próprias, observou-se a existência de elementos conceituais e objetivos recorrentes, o que permitiu a categorização dos trabalhos em dois grupos principais:

1. Estudos que propõem soluções tecnológicas voltadas ao descarte ambientalmente adequado de REEE, abrangendo plataformas, aplicativos e sistemas informatizados para apoio à logística reversa;
2. Iniciativas que promovem a participação eletrônica da população no processo de descarte de REEE, por meio de mecanismos digitais que incentivam o engajamento cidadão, a transparência e a corresponsabilidade ambiental.

Essa categorização foi fundamental para a sistematização dos dados e para a extração de *insights* que subsidiaram as discussões posteriores desta pesquisa. A aplicação desses critérios assegurou a robustez do processo de seleção e permitiu a construção de um *corpus* alinhado aos objetivos da investigação, conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Fluxograma *PRISMA*.

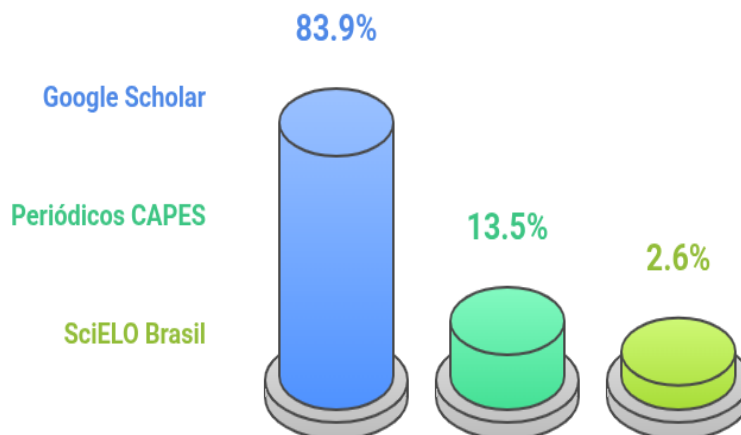


Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

A busca inicial realizada nas bases de dados eletrônicas a partir das *strings* definidas resultou em um total de 281 publicações, das quais a maioria teve origem na base de dados

Google Scholar (83,9%), seguida pelo *Periódicos CAPES* (13,5%) e *SciELO Brasil* (2,6%), como evidenciado no Gráfico 1.

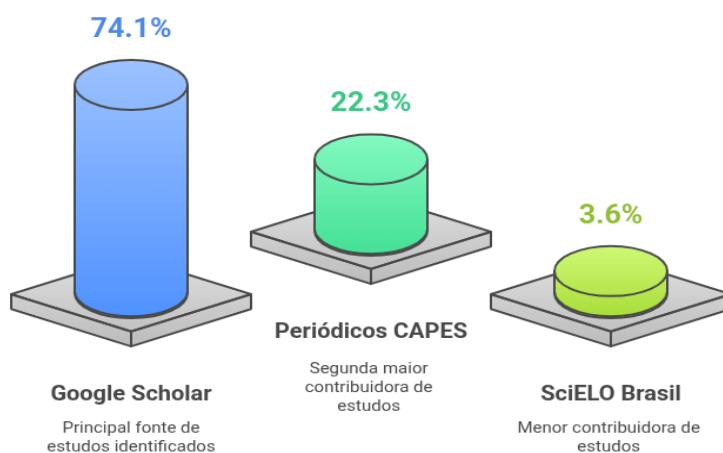
Gráfico 1 – Distribuição de artigos por fonte.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

Em seguida, com a verificação de duplicidades, foram retiradas 142 produções, restando 139 artigos para a aplicação dos critérios de inclusão e exclusão previamente estabelecidos no processo de triagem, dos quais a maioria teve origem na base de dados *Google Scholar* com 103 (74,1%), seguida pelo *Periódicos CAPES* com 31 (22,3%) e *SciELO Brasil* com 5 (3,6%), como pode ser visto no Gráfico 2.

Gráfico 2 – Distribuição de artigos aceitos por fonte.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

Esse número foi reduzido para 56 registros, visto que 83 documentos foram retirados. Os dados foram organizados em planilhas no formato *.xlsx*; posteriormente, procedeu-se à leitura diagonal dos 56 estudos como parte do método de elegibilidade, etapa na qual 44 artigos foram descartados por não apresentarem aderência direta aos critérios de qualidade da

pesquisa, e ainda foram retirados mais 2 estudos devido à similaridade com outro estudo selecionado para análise final.

Ao final desse processo, 10 estudos foram selecionados para leitura e análise integral, visando subsidiar a elaboração dos resultados desta revisão sistemática. Os trabalhos que atenderam plenamente aos critérios estabelecidos estão organizados no Quadro 1.

Quadro 1 – Relação de estudos incluídos na RSL.

Estudo	Autor(es)	Afiliação	Ano
Análise da Gestão dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) em João Pessoa/PB	Ícaro Matheus Nóbrega Santiago; Gabriela Dias de Oliveira; Hesmaelly da Silva Pereira; Anna Kryslene Viana Chianca Brilhante; Elisângela M. Rodrigues Rocha	Universidade Federal da Ceará (UFC)	2016
A Cultura do Descarte: O Uso e Descarte do Celular em Campina Grande	Diego Ygor Silva e Santos; José Giovanni dos Santos; Marconi Luiz França	Universidade Federal de Campina Grande (UFCG)	2018
Plataforma Multilateral de Negócios para a Logística Reversa de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos	Napoleão Verardi Galegale; Olivia Amaral Prado; Marcelo Tsuguio Okano; Pedro Luiz Cortes	Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza (CEETEPS)	2018
Sistema Web Destinado ao Descarte e Bonificação de Resíduos Eletrônicos em Manaus	Jonathas da Silva Colares; Hevelin Cristiane Lopes Pinho; Yan de Souza Borges; Bruno Pereira Gonçalves	Centro Universitário FAMETRO	2019
Conhecimento Em Indústria 4.0 e Práticas de Economia Circular: Estudo de Caso em uma Rede de Resíduos Eletroeletrônicos	Elizabel Cristina Silva Osmundo de Souza	Universidade Paulista (UNIP) / Programa de Pós-Graduação em Administração	2020
Inovação na Cadeia Reversa de Resíduos Eletroeletrônicos: Um Estudo Sobre os Sistemas de Informação e as Tecnologias de Rastreamento	Odair Oliveira Bernardo; Maria Tereza Saraiva de Souza; Jacques Demajorovic	Centro Universitário FEI	2020
Uso de Aplicativos na Educação Ambiental como Ferramenta para Conscientização no Descarte Correto do Lixo Eletrônico	Adriana dos Santos Franco; Cleumar da Silva Moreira; Jefferson Cavalcante de Lima; Juliane Cabral Silva; Velber Xavier Nascimento; Paulo Rogério Barbosa de Miranda;	Instituto Federal de Alagoas (IFAL)	2023

	Adriane Borges Cabral		
Educação Ambiental Como Instrumento de Política Pública: Uma Análise da Gestão do Lixo Eletrônico na Cidade de Belém-PA	Moises Santiago de Oliveira	Universidade Federal do Pará (UFPA) / Programa de Pós-Graduação em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local da Amazônia (PPGEDAM)	2023
Gestão e Gerenciamento dos Resíduos Eletrônicos do Setor de Informática em Agências Governamentais do Estado do Espírito Santo	Roger Trancozo de Jesus	Universidade Federal do Espírito Santo (UFES) / Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável	2023
ARENA REEE: Estratégia Gamificada de Ensino e Aprendizagem Sobre Gestão de Resíduos de Equipamento Eletroeletrônico	Giovanna Gabrielly Nepon Silva; Marcelle Elisa Fontana; V. Nepomuceno	Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)	2024

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

A síntese dos resultados foi conduzida por meio da tabulação dos dados, seguida da elaboração de relatórios ilustrados com gráficos, figuras e tabelas, a fim de apresentar de maneira clara e estruturada as evidências coletadas. O quadro abaixo apresenta os tipos das publicações e veículos de comunicação científica.

Quadro 2 – Relação de estudos por tipo e veículo.

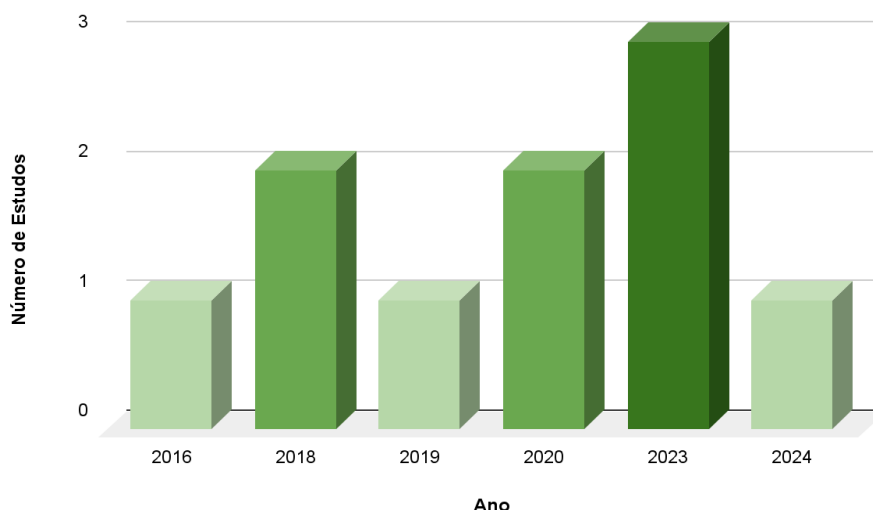
Tipo de publicação	Veículo de comunicação científica	Ano
Artigo de Congresso	Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade	2016
	Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design	2018
	Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente - XX ENGEMA	2018
Artigo de Revista	Revista Internacional de Negócios Sustentáveis	2019
	Revista de Administração de Empresas - RAE	2020
	Diversitas Journal	2023
	Programa de Pós-Graduação em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local da Amazônia	2023

Dissertação de Mestrado	Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável	2023
	Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Paulista – UNIP	2020
Artigo de Simpósio	Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital	2024

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

A análise da distribuição temporal dos estudos revela uma tendência crescente de publicações sobre o tema nos últimos anos, especialmente entre 2016 e 2024, como pode ser observado no Gráfico 3.

Gráfico 3 – Relação de estudos incluídos na RSL por ano.

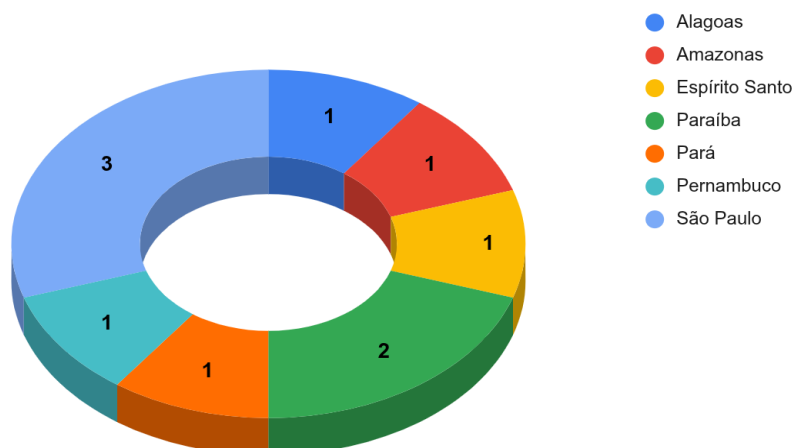


Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

O ano de 2023 destaca-se com três publicações, indicando um interesse recente e contínuo na pesquisa sobre resíduos eletroeletrônicos e temas correlatos. Há um pico de estudos a partir de 2018, com um estudo projetado para 2024, o que demonstra a relevância e a contemporaneidade do assunto na literatura acadêmica brasileira. Isso pode ser atribuído à evolução das discussões sobre sustentabilidade, às políticas públicas (como a PNRS) e ao crescente volume de resíduos eletrônicos gerados.

A distribuição geográfica dos estudos, baseada nas afiliações dos autores ou no foco regional das pesquisas, mostra uma concentração em algumas regiões do Brasil, como observa-se no Gráfico 4.

Gráfico 4 - Distribuição dos estudos por estado.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

O estado de São Paulo lidera com três estudos, seguido pela Paraíba com dois. Outros estados como Pernambuco, Alagoas, Espírito Santo, Pará e Amazonas contribuem com um estudo cada. Essa concentração sugere que os centros de pesquisa nessas regiões estão ativamente engajados na discussão e busca por soluções para o gerenciamento de resíduos eletroeletrônicos, refletindo, possivelmente, a densidade populacional, o desenvolvimento industrial e a geração de e-lixo nesses locais.

Com base nos dados obtidos por meio da RSL, foram identificadas práticas distintas relacionadas à gestão de REEE. Para proporcionar uma representação visual intuitiva da frequência com que essas práticas e temas emergiram nos estudos analisados, utilizou-se a ferramenta *WordArt* para a construção de uma nuvem de palavras (Figura 5). A visualização foi organizada com variações de tamanho, formato e cor, refletindo a incidência proporcional de cada termo entre os documentos revisados.

Figura 5 - Nuvem de palavras gerada a partir das práticas na RSL.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

Na Figura 5, observa-se, após a análise dos documentos fornecidos, um foco central e consistente na problemática dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos (REEE). Os termos "REEE" (215 ocorrências), "gestão" (198 ocorrências) e "logística reversa" (176 ocorrências) aparecem com a maior frequência, indicando que a discussão principal gira em torno dos desafios e soluções para o gerenciamento desses materiais. A "logística reversa" é tratada como um instrumento crucial para viabilizar a coleta e a restituição desses resíduos ao setor produtivo. Um tema de grande destaque é o papel da "educação ambiental" (145 ocorrências). Os documentos enfatizam que a conscientização é fundamental para que a população e os gestores compreendam os impactos do descarte inadequado e participem de forma mais efetiva dos programas de coleta; o termo "tecnologias" (105 ocorrências) e os "aplicativos" (87 ocorrências) surgem como ferramentas promissoras para impulsionar a mudança. Várias pesquisas propõem a criação de sistemas *web*, plataformas multilaterais e jogos gamificados para incentivar o descarte correto, fornecer informações sobre pontos de coleta e bonificar os participantes, confrontando a legislação nacional ("PNRS" com 75 ocorrências) com as realidades e deficiências de gestão.

A gestão de REEE apresenta uma complexidade crescente, exigindo, portanto, soluções inovadoras que se desprendam das abordagens tradicionais. Nesse contexto, a literatura recente tem explorado intensamente o papel crucial da tecnologia e do engajamento social como pilares para a construção de sistemas de descarte ambientalmente adequados e, sobretudo, eficientes.

Uma análise dos estudos disponíveis revela a emergência de duas frentes de pesquisa intrinsecamente interconectadas, as quais merecem nossa atenção, como já fora citado

anteriormente: a proposição de soluções tecnológicas e a promoção da participação cidadã por meio de mecanismos eletrônicos. Observa-se que, embora essas áreas sejam frequentemente abordadas de forma independente, o verdadeiro potencial reside na sinergia entre elas. De fato, a mera implementação de tecnologias avançadas sem o devido engajamento da população pode resultar em iniciativas que, apesar de tecnicamente sofisticadas, falham em sua execução prática. Da mesma forma, o estímulo à participação sem o suporte de plataformas digitais eficazes pode limitar o alcance e a escalabilidade das ações.

Assim, percebe-se que o desafio reside não apenas em desenvolver ferramentas tecnológicas ou em fomentar a conscientização, mas em arquitetar um ecossistema onde a inovação tecnológica sirva como catalisador para uma participação cidadã mais informada e proativa. A integração dessas duas vertentes é fundamental para transcender as limitações das abordagens isoladas e, por conseguinte, pavimentar o caminho para uma gestão de REEE verdadeiramente transformadora e sustentável.

5.4.1 Soluções tecnológicas voltadas ao descarte ambientalmente adequado de reee

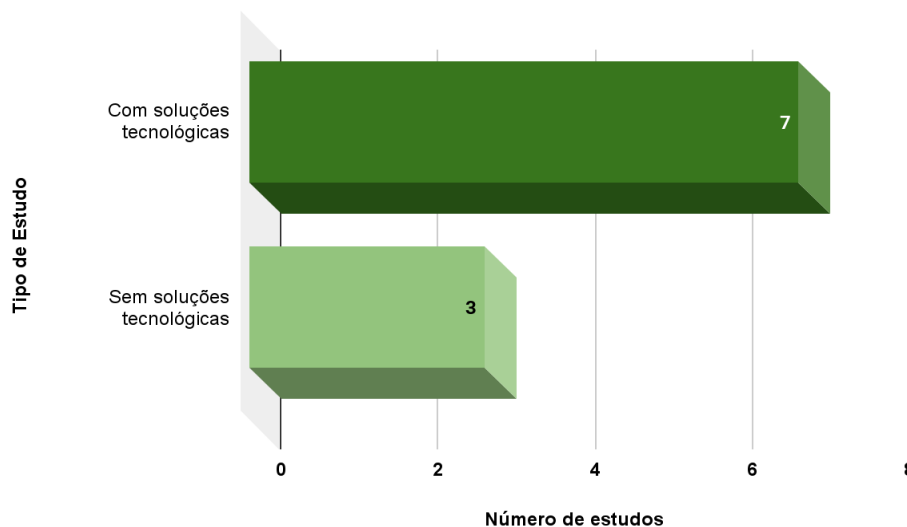
A digitalização e a inovação tecnológica são reconhecidas como catalisadores para aprimorar a logística reversa e o descarte adequado de REEE. Os estudos analisados reiteram essa percepção, propondo e/ou investigando ferramentas digitais e sistemas informatizados. Essas soluções visam otimizar cada etapa do processo: desde a coleta inicial, passando pela triagem, até o fundamental retorno desses resíduos à cadeia produtiva.

Nesse cenário, é perceptível que a tecnologia não atua apenas como um facilitador, mas como um elemento transformador que permite, por exemplo, o rastreamento mais preciso dos materiais, a comunicação eficiente entre os diversos elos da cadeia, desde o consumidor final até as empresas recicladoras, e a coleta de dados valiosos para aprimorar continuamente as estratégias de gestão. A integração de plataformas digitais, aplicativos móveis e sistemas de gerenciamento de dados em tempo real é crucial para superarmos os desafios operacionais e logísticos que historicamente dificultam a efetividade da logística reversa. Dessa forma, a digitalização não é apenas uma tendência, mas uma necessidade premente para alcançarmos patamares mais elevados de circularidade e sustentabilidade na gestão dos REEE.

O Gráfico 5 é bastante revelador, demonstrando que a maioria dos estudos (7 de 10) na amostra analisada dedica-se a abordar propostas ou análises de soluções tecnológicas para o

descarte de REEE. Esse dado sinaliza o reconhecimento na literatura científica sobre o papel transformador que a tecnologia desempenha na superação dos complexos desafios da gestão de resíduos eletrônicos.

Gráfico 5 - Estudos que propõem soluções tecnológicas para o descarte de REEE.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

Essa preferência por estudos focados no desenvolvimento e na aplicação de inovações tecnológicas sugere que a tecnologia não é apenas um facilitador, mas a espinha dorsal para a construção de sistemas de descarte mais eficientes, transparentes e ambientalmente responsáveis. De fato, a ausência de soluções tecnológicas robustas provavelmente limitaria a escalabilidade e a eficácia de qualquer iniciativa de logística reversa. Embora outros aspectos sejam importantes, a tecnologia emerge como o motor impulsionador da mudança nesse campo. No entanto, o papel da tecnologia não se restringe apenas às ferramentas de *interface* direta com o usuário, como pode ser evidenciado no Quadro 3.

Quadro 3 - Panorama de soluções tecnológicas para Logística Reversa de REEE.

Nome da Solução	Contribuição	Tipo de Solução	Público-Alvo	Integração com a Cadeia Reversa de REEE
RECICLA-E	• Incentivo ao descarte; • Incentivo a coleta seletiva; • Interação; • Orientação; • Educação.	Aplicativo móvel	População urbana geral em	Integração com programas municipais de coleta seletiva

Sem Identificação - Tecnologias de Rastreamento	• Análise do uso de tecnologias (RFID, código de barras, chips); • Sistemas rastreamento para e otimização.	Estudo técnico/analítico	Setor industrial e logístico	Integração com sistemas de logística de indústrias
ARENA REEE	• Ensino e aprendizagem sobre a gestão de REEE com base nos 6R's.	Jogo educacional	Estudantes e comunidade escolar	Integração em escolas e instituições de ensino
Sem Identificação - Ferramenta para Conscientização no Descarte Correto do Lixo Eletrônico	• Educação ambiental; • Localização de pontos de descarte; • Denúncia de crimes ambientais.	Revisão/estudo de aplicativos	População conectada digitalmente	Integração com ONGs, campanhas governamentais e sistemas de coleta urbana
Sem Identificação - Indústria 4.0 e Práticas de Economia Circular	• Análise do uso de tecnologias da Indústria 4.0; • Otimizar processos; • Rastreabilidade; • Práticas circulares.	Estudo de caso	Empresas e gestores de REEE	Integração com sistemas de gestão industrial e de ONGs
REEEcicla	• Conexão entre os agentes da cadeia de logística reversa (consumidores, recicladores).	Plataforma web	Consumidores, recicladores	Integração com empresas de reciclagem, transportadoras e prefeituras
e-DISCARD	• Simulação de pesagem; • Geração de cupons para descarte correto de eletrônicos.	Sistema web	População de Manaus	Integração com comércio local, sistemas de logística e órgãos ambientais

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

A pesquisa explora tecnologias de fundo que otimizam as operações da cadeia reversa. Como demonstrado por Bernardo *et al.* (2023), os sistemas de informação e tecnologias de rastreamento, como *RFID* e códigos de barras, apresentam significativo potencial para otimizar os processos de desmontagem e reciclagem na cadeia reversa de resíduos eletroeletrônicos. Contudo, é notável a ressalva sobre a incipiência de seu uso no Brasil para a logística reversa. Da mesma forma, como demonstrado por Souza (2020), as tecnologias da *Indústria 4.0*, como *Big Data*, *IoT* e *Blockchain*, exercem influência significativa na otimização de processos e garantia de rastreabilidade nas práticas de Economia Circular em redes de resíduos eletroeletrônicos. Mais uma vez, o estudo aponta para um conhecimento

ainda escasso dessas tecnologias no setor, o que sugere uma lacuna de treinamento e investimento.

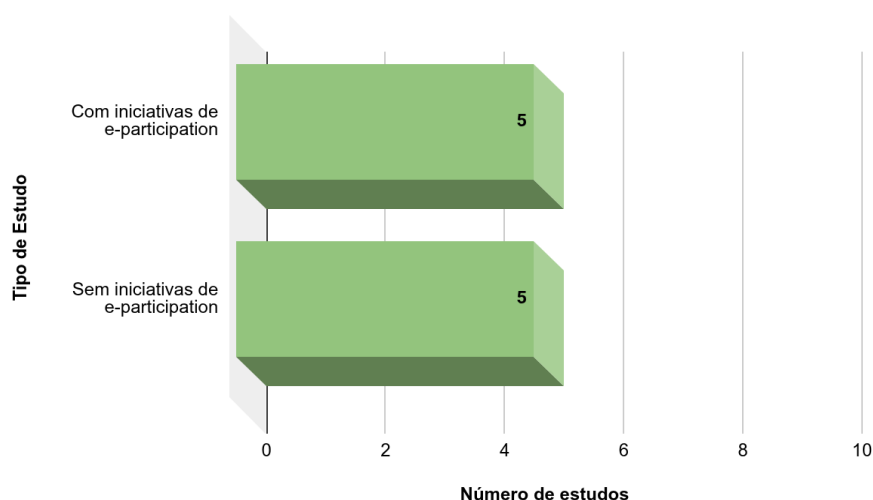
5.4.2 Iniciativas que promovem a participação eletrônica da população no processo de descarte de reee

É importante destacar que o papel da tecnologia não se limita à otimização logística, pois se estende de forma significativa à educação e à conscientização. Como destacam Silva *et al.* (2023), as estratégias gamificadas representam uma abordagem inovadora no processo educativo sobre gestão de resíduos eletroeletrônicos, superando a aplicação convencional das tecnologias; o estudo propõe um jogo gamificado como ferramenta tecnológica para ensinar sobre a gestão de REEE. Além disso, como evidenciado por Franco *et al.* (2023), os aplicativos móveis emergem como ferramentas versáteis para conscientização ambiental, oferecendo desde informações educativas até funcionalidades práticas para localização de pontos de descarte adequado de lixo eletrônico.

A literatura revela um consenso crescente: as soluções tecnológicas, sejam elas plataformas integradas, aplicativos de consumo ou tecnologias de rastreamento industrial, são absolutamente cruciais para aprimorar a eficiência, a rastreabilidade e a sustentabilidade dos processos de descarte e logística reversa de REEE. A tecnologia, portanto, não é apenas um facilitador, mas um pilar para a construção de um futuro mais circular para os resíduos eletrônicos.

O Gráfico 6 mostra que, entre os estudos analisados, metade foca em iniciativas que promovem a participação eletrônica da população no descarte de REEE, reforçando a importância crítica do engajamento cidadão para a efetividade da logística reversa.

Gráfico 6 - Estudos que propõem a *e-participation* no descarte de REEE.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

Para que os sistemas de descarte de REEE sejam realmente eficazes, é fundamental que a população esteja envolvida e ativa nesse processo. A ênfase na participação eletrônica sugere que as plataformas e ferramentas digitais são vistas como veículos poderosos para mobilizar os cidadãos, tornando o descarte correto mais acessível, conveniente e até mesmo recompensador. Essa convergência entre tecnologia e engajamento apresenta-se como um caminho promissor para superar as barreiras de conscientização e ação que historicamente afetam a gestão de resíduos, como se observa no Quadro 4.

Quadro 4 - Contribuições de *e-participation* para o descarte consciente de REEE.

Estudos	Mecanismos de participação eletrônica identificados	Incentivos Utilizados	Foco do Estudo
RECICLA-E	- Bonificações ao usuário; - Informações e transparência; - Estímulo à corresponsabilidade.	- Bonificação; - Orientação; - Educação ambiental.	Educação Ambiental.
ARENA REEE	- Aprendizagem lúdica; - Conscientização ambiental; - Estímulo à mudança de comportamento.	- Gamificação; - Aprendizado lúdico.	Educação Ambiental através de processo lúdico.
Ferramenta para Conscientização no Descarte	- Informação e interação; - Educação ambiental;	- Educação; - Localização; - Denúncia.	Conscientização da população.

Correto do Lixo Eletrônico	Engajamento da população no descarte correto.		
REEEcicla	- Conexão entre consumidores e atores; - Agendamento de coleta; - Rastreabilidade; - Corresponsabilidade; - Eficiência logística.	- Conectividade; - Agendamento; - Rastreamento; - Incentivos monetários; - Educação.	Plataforma gerencial.
e-DISCARD	- Estímulo ao descarte correto; - Bonificação (descontos); - Rastreabilidade; - Transparência.	- Bonificação com cupons; - Simulação de descarte.	Sistema de bonificação.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

5.4.3 Análise crítica das metodologias empregadas nos estudos selecionados

A análise metodológica dos estudos incluídos nesta revisão revela uma predominância de abordagens qualitativas e exploratórias, com forte ênfase no método de Estudo de Caso. Esta tendência, observada em trabalhos como os de Bernardo *et al.* (2020), Oliveira (2023) e Jesus (2023), indica que a literatura atual ainda se concentra fortemente no diagnóstico de cenários locais e na compreensão das barreiras organizacionais e legislativas, muitas vezes em detrimento do desenvolvimento prático de soluções tecnológicas. Observa-se uma divisão clara entre estudos de diagnóstico e estudos de proposição tecnológica:

- Estudos de Diagnóstico:** Utilizam majoritariamente entrevistas semiestruturadas, análise documental e observação direta para mapear a gestão de REEE em contextos específicos, como Belém, João Pessoa e órgãos públicos do Espírito Santo. Embora essenciais para a contextualização do problema, como visto em Santiago *et al.* (2016) e Oliveira (2023), estes estudos raramente avançam para a fase de construção de ferramentas interventivas.
- Estudos de Proposição Tecnológica:** Trabalhos como os de Colares *et al.* (2019) e Silva *et al.* (2024) adotam a Pesquisa Aplicada, combinando levantamentos de requisitos (*survey*) com a prototipagem de sistemas ou jogos. No entanto, nota-se que a validação dessas soluções muitas vezes ocorre em ambientes controlados ou acadêmicos, sem uma metodologia de *design* formalizada e iterativa como a *Design Science Research Methodology (DSRM)*.

A revisão também identificou o uso de Revisões Sistemáticas de Literatura como método exclusivo em alguns trabalhos, como o de Franco *et al.* (2023), que mapeou aplicativos existentes. Isso reforça a importância de consolidar o conhecimento teórico antes do desenvolvimento prático.

Uma lacuna metodológica significativa identificada é a escassez de estudos que integrem, de forma robusta, o diagnóstico local (qualitativo) com o desenvolvimento e validação de campo de um artefato tecnológico (quantitativo/experimental). A maioria das soluções de *software* propostas, como o *e-DISCARD* ou o modelo de negócios de Galeale *et al.* (2018), foca na concepção e modelagem, mas carece de dados longitudinais sobre a eficácia da *e-participation* após a implantação.

O Quadro 5, a seguir, sintetiza as abordagens metodológicas, técnicas de coleta de dados e o foco de cada estudo selecionado.

Quadro 5 - Síntese das metodologias dos estudos incluídos na RSL.

Estudo (Autor/Ano)	Abordagem Metodológica	Técnicas e Instrumentos de Coleta	Foco Principal da Investigação
Colares <i>et al.</i> (2019)	Mista (Quali-Quantitativa) e Aplicada	• Pesquisa bibliográfica; • Aplicação de questionário (<i>survey</i>) à população; • Desenvolvimento de protótipo <i>web</i>.	Desenvolvimento de sistema <i>web</i> para bonificação e descarte em Manaus.
Bernardo <i>et al.</i> (2020)	Estudo de Caso Único (Integrado)	• Entrevistas semiestruturadas; • Análise documental; • Observação direta em múltiplas unidades de análise da cadeia.	Uso de sistemas de informação e tecnologias de rastreamento (<i>RFID</i>) na cadeia reversa.
Silva <i>et al.</i> (2024)	Pesquisa Descritiva e Exploratória (Aplicada)	• Ciclo PDCA adaptado para jogos; • Desenvolvimento de jogo de cartas; • Validação via questionário e observação <i>in loco</i>.	Estratégia gamificada (<i>ARENA REEE</i>) para ensino sobre gestão de REEE.
Oliveira (2023)	Qualitativa e Exploratória	• Levantamento de campo; • Entrevistas com órgãos públicos e cooperativas; • Análise documental/legislativa.	Análise de políticas públicas e governança do lixo eletrônico em Belém-PA.

Franco <i>et al.</i> (2023)	Revisão Bibliográfica (RSL)	Busca sistemática em bases de dados (<i>Google Scholar</i>) com descritores específicos sobre <i>apps</i> ambientais.	Mapeamento de aplicativos móveis para educação ambiental e descarte.
Galegale <i>et al.</i> (2018)	Pesquisa Exploratória e Qualitativa	- Pesquisa bibliográfica; - Modelagem de negócios utilizando o <i>framework Business Model Canvas (BMC)</i>.	Proposição de modelo de plataforma multilateral de negócios para logística reversa.
Santiago <i>et al.</i> (2016)	Estudo de Caso Exploratório-Descritivo	Pesquisa de campo com aplicação de questionários a empresas de manutenção e reciclagem.	Diagnóstico da gestão de REEE em empresas de manutenção em João Pessoa-PB.
Santos <i>et al.</i> (2018)	Pesquisa de Campo / Design Centrado no Usuário	- Aplicação de questionários sobre hábitos de descarte; - Criação de protótipo de alta fidelidade (<i>app</i>).	Análise comportamental da "cultura do descarte" para criação do <i>app RECICLA-E</i> .
Souza (2020)	Estudo de Caso Qualitativo	Entrevistas em profundidade com atores da rede de resíduos e análise de conteúdo.	Relação entre Indústria 4.0, Economia Circular e gestão de conhecimento na rede de REEE.
Jesus (2023)	Estudo de Caso	- Levantamento de dados primários sobre ativos de TI; - Análise de procedimentos de desfazimento em órgãos públicos.	Gestão de resíduos de informática em agências governamentais do Espírito Santo.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

5.5 DISCUSSÃO

As iniciativas que promovem a participação eletrônica da população são um reflexo direto da necessidade de superar a barreira da baixa conscientização e do engajamento limitado dos cidadãos no processo de descarte de REEE. É notório que somente a existência de pontos de coleta ou políticas públicas, sem o devido envolvimento do público, torna-se ineficaz.

Nesse sentido, Santos *et al.* (2018) apresentam uma contribuição relevante com o desenvolvimento do aplicativo *RECICLA-E*, demonstrando na prática como soluções tecnológicas podem enfrentar os desafios culturais do descarte inadequado de celulares em contextos urbanos específicos. Sua estratégia de engajar usuários por meio de bonificações e informações, aumentando a transparência e a corresponsabilidade, é um caminho promissor. Essa abordagem encontra eco no sistema de Colares *et al.* (2019), o *e-DISCARD*, como solução inovadora que alia incentivos econômicos à rastreabilidade, demonstrando a eficácia de mecanismos de bonificação no engajamento populacional para o descarte correto de resíduos eletrônicos em Manaus. É evidente que a combinação de conveniência e incentivo se mostra um poderoso motor para a ação individual.

Além disso, a ludicidade emerge como um caminho particularmente eficaz para a participação. O jogo gamificado proposto no estudo de Silva *et al.* (2024) ilustra como uma abordagem interativa e educativa pode promover a conscientização e, o mais importante, a mudança de comportamento, que são pilares da corresponsabilidade ambiental. Isso evidencia que a educação ambiental, quando incorporada a ferramentas lúdicas, tem um potencial ainda inexplorado.

Franco *et al.* (2023) evidenciam em sua revisão sistemática que os aplicativos ambientais funcionam como eficientes propulsores de informação, transformando dispositivos móveis em poderosas ferramentas de engajamento público para o descarte adequado de REEE. Aprofundando essa discussão, o estudo traz ainda uma análise de como diversos aplicativos servem como verdadeiros "propulsores de informação" para conscientizar e engajar o público no descarte correto de REEE. Eles oferecem funcionalidades variadas, como a localização de pontos de coleta e informações detalhadas sobre os impactos ambientais, atuando como pontes digitais entre os cidadãos e os sistemas de coleta existentes. Essa acessibilidade e a oferta de informações claras são cruciais para que o cidadão se sinta capacitado a agir.

Finalmente, Galeale *et al.* (2018) propõem um sistema que, ao conectar todos os elos da cadeia, incluindo, de forma fundamental, o consumidor, incentiva a participação ativa por meio de mecanismos digitais de agendamento de coleta, rastreamento e incentivos. Tal sistema não apenas facilita o processo, mas também cria um ecossistema onde o cidadão se sente verdadeiramente parte do processo e é incentivado a agir de forma responsável.

Os estudos analisados demonstram uma clara direção para o uso de ferramentas digitais e plataformas interativas como meios altamente eficazes para promover o engajamento da população, aumentar a conscientização e, por conseguinte, estabelecer um modelo robusto de co-responsabilidade no descarte de REEE. A tecnologia, nesse contexto, não é um fim em si mesma, mas um catalisador fundamental para a mudança de comportamento e a construção de uma cultura de descarte ambientalmente responsável.

A análise da literatura revela que, embora a Tecnologia da Informação e os princípios da Indústria 4.0 apresentem um enorme potencial para otimizar a logística reversa de REEE, sua aplicação no Brasil ainda é, infelizmente, incipiente. Estudos como os de Bernardo *et al.* (2020) e Souza (2020) indicam que sistemas de rastreamento como *RFID* e códigos de barras, amplamente consolidados na logística direta, não encontram o mesmo nível de emprego na logística reversa. Essa lacuna tecnológica, segundo os autores, dificulta severamente a triagem, classificação e rastreabilidade dos produtos, impedindo que sejam eficientemente direcionados para reuso, remanufatura ou reciclagem.

Pode-se observar que os entraves mais significativos para as empresas residem na percepção de que o investimento em tecnologias de rastreamento eleva os custos operacionais sem, aparentemente, contribuir de forma direta para o aumento de vendas ou lucratividade. Essa visão de curto prazo negligencia os benefícios ambientais e o potencial de novas oportunidades de negócio que uma logística reversa mais eficiente poderia gerar. É fundamental que as empresas no Brasil comecem a enxergar esses investimentos não como custos adicionais, mas como um diferencial competitivo e um compromisso com a sustentabilidade.

5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Evidenciou-se que o presente estudo cumpriu o objetivo de mapear e analisar as soluções de *software* voltadas à logística reversa de REEE, revelando um panorama onde a tecnologia atua como o elo fundamental entre a complexidade operacional da gestão de resíduos e a necessidade de engajamento social. Isso permitiu observar uma dicotomia entre o potencial teórico das tecnologias emergentes e a realidade aplicável ao contexto brasileiro, consolidando duas frentes de evidências principais: a funcionalidade técnica e a modulação comportamental via *e-participation*.

No que concerne à funcionalidade e aplicabilidade, conclui-se que, embora os princípios da Indústria 4.0 (como *IoT*, *RFID* e *Blockchain*) representem o estado da arte para a rastreabilidade e triagem industrial, a sua implementação no Brasil ainda é incipiente, restringida por barreiras de infraestrutura e custos elevados. Em contrapartida, as evidências apontam para a consolidação de *soft technologies*, especificamente aplicativos móveis e plataformas *web*, como as ferramentas mais eficazes para o cenário atual. Estas soluções preenchem a lacuna logística ao oferecerem funcionalidades essenciais de geolocalização de ecopontos e agendamento de coletas, atacando diretamente a barreira da inconveniência que historicamente desestimula o descarte correto.

Simultaneamente, o estudo demonstrou que a incorporação de mecanismos de participação eletrônica é o diferencial crítico para a efetividade dessas plataformas. Mais do que meros instrumentos de gestão, as soluções analisadas atuam como agentes de educação e incentivo. A integração de estratégias de gamificação e sistemas de bonificação (*rewards*) revelou-se uma estratégia poderosa para converter a consciência ambiental abstrata em ação prática, superando a passividade do cidadão. A tecnologia, neste contexto, não apenas instrumentaliza o descarte, mas valoriza o papel do usuário dentro da cadeia de valor da logística reversa.

Em suma, conclui-se que a viabilidade da logística reversa de REEE em municípios de médio porte não reside, neste momento, na automação industrial pesada, mas sim no desenvolvimento de sistemas híbridos e acessíveis. A convergência entre funcionalidades logísticas robustas e estratégias de *e-participation* constitui o caminho mais promissor para operacionalizar a responsabilidade compartilhada preconizada pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, transformando a gestão de resíduos numa prática colaborativa, transparente e socialmente engajada.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. G. S.; AMORIM, E. L. C.; JÚNIOR, C. R. M. L.; SILVA, J. A. **Gestão de resíduos sólidos urbanos: um diagnóstico dos municípios do Sertão Alagoano**. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 8, n. 1, p. 483–516, 2019. DOI: 10.19177/rgsa.v8e12019483-516.

BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; FORTI, V.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2017**. United Nations University, International Telecommunication Union & International Solid Waste Association, 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/Global-E-waste%20Monitor%202017%20-%20Executive%20Summary.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.

BARBIERI, J. C.; DIAS, M. **Logística reversa como instrumento de programas de produção e consumo sustentável**. Tecnologias. São Paulo, 77, 58-69, 2002.

BERNARDO, O. O.; SOUZA, M. T. S. de; DEMAJOROVIC, J. **Inovação na cadeia reversa de resíduos eletroeletrônicos: um estudo sobre os sistemas de informação e as tecnologias de rastreamento**. RAE – Revista de Administração de Empresas, São Paulo, v. 60, n. 4, p. 248-261, jul./ago. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-759020200402>.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). **Portal de Periódicos**. Brasília, DF, [20--]. Disponível em: <https://www.periodicos.capes.gov.br/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

COLARES, J. S.; PINHO, H. C. L.; BORGES, Y. S.; GONÇALVES, B.P. **Sistema web destinado ao descarte e bonificação de resíduos eletrônicos em Manaus**. Sustainable Business International Journal, v. 90, p. 1-25, 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) – SCYCLE Programme, International Telecommunication Union (ITU), International Solid Waste Association (ISWA), 2020.

FRANCO, A. S.; MOREIRA, C. S.; LIMA, J. C.; SILVA, J. C.; NASCIMENTO, V. X.; MIRANDA, P. R. B.; CABRAL, A. B. **Uso de aplicativos na educação ambiental como ferramenta para conscientização no descarte correto do lixo eletrônico**. *Diversitas Journal*, v. 8, n. 2, p. 771-787, abr./jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v8i2.2121>.

GALEGALE, N. V.; PRADO, O. A.; TOKANO, M.; CORTES, P. L. **Plataforma multilateral de negócios para a logística reversa de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**. In: Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente (ENGEMA), 20., 2018, São Paulo. São Paulo: ENGEMA, 2018. ISSN 2359-1048.

GOOGLE. **Google Acadêmico**. [S.l.], [20--]. Disponível em: <https://scholar.google.com.br/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

GONÇALVES-DIAS, S. L. F.; SILVA, J. G. M. **O "trabalho desperdiçado": estudo em uma cooperativa de catadores de materiais recicláveis no município de São Paulo**. *Terra – Habitats Urbanos e Rurais*, v. 3, p. 1370–1385, 2019. ISBN: 978-85-68066-82-9.

GREENTEC. **IT Asset Disposal and E-Waste Recycling**. Disponível em: <https://www.greentec.com/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

GUARNIERI, P.; CERQUEIRA-STREIT, J. A.; BATISTA, L. C. **Reverse logistics and the sectoral agreement of packaging industry in Brazil towards a transition to circular economy**. *Resources, Conservation and Recycling*, 153, p. 104541, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104541>.

HANNAN, M. A.; MAMUN, M. A. A.; HUSSAIN, A.; BASRI, H.; BEGUM, R. A. **A review on technologies and their usage in solid waste monitoring and management**

systems: Issues and challenges. Waste Management, v. 43, p. 509-523, 2015. DOI: 10.1016/j.wasman.2015.05.033.

JESUS, R. T. de. **Gestão e gerenciamento dos resíduos eletrônicos do setor de informática em agências governamentais do Estado do Espírito Santo.** 2023. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2023.

JULIUS BAER. **Cataki: A recycling match made online.** Disponível em: <https://www.juliusbaer.com/en/insights/future-insights/future-cities/cataki-a-recycling-match-made-online/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

KITCHENHAM, B.; BRERETON, O. P.; BUDGEN, D.; TURNER, Ma.; BAILEY, J.; LINKMAN, S. **Systematic literature reviews in software engineering – A systematic literature review.** Information and Software Technology, v. 51, n. 1, p. 7-15, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>.

KRAUS, S.; BREIER, M.; LIM, W. M.; DABIC, M.; KUMAR, S.; KANBACH, D.; MUKHERJEE, D.; CORVELLO, V.; PIÑEIRO-CHOUSA, D.; SCHIAVONE, F.; FERRARIS, A.; FERNANDES, C.; FERREIRA, J.J. **Revisões de literatura como estudos independentes: diretrizes para a prática acadêmica.** Rev Manag Sci, 16, p. 2577–2595, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11846-022-00588-8>.

LEITE, P. R. **Logística Reversa: Meio Ambiente e Competitividade.** 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

LIBERATI, A.; ALTMAN, D. G.; TETZLAFF, J.; MULROW, C.; GOTZSCHE, P. C.; IOANNIDIS, J. P. A.; CLARKE, M.; DEVEREAUX, P. J.; KLEIJNEN, J.; MOHER, D. **The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration.** PLoS Medicine, v. 6, n. 7, e1000100, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000100>.

MORAES, C. S. B. de; MARTIRES, G. M. B. M.; BONARETTO, C. M. V.; CAMPOS, M. O.; ANSANELLI, S. L. M.; OLIVEIRA, J. A.; MAIA, J. V. F.; BARBOSA, M. C. S. **Gestão**

de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em municípios do Estado de São Paulo: caracterização e propostas de diretrizes. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 11, p. 109842–109871, nov. 2021. ISSN: 2525-8761. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-557>.

NOWAKOWSKI, P.; MRÓWCZYŃSKA, B. **Towards sustainable WEEE collection and transportation methods in circular economy: Comparative study for rural and urban settlements.** Resources, Conservation and Recycling, 135, p. 93-107, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.016>.

OKOLI, C. **Um Guia para a Condução de uma Revisão Sistemática de Literatura Independente.** Comunicações da Associação para Sistemas de Informação, 37, 2015. DOI: <https://doi.org/10.17705/1CAIS.03743>.

OLIVEIRA, M. S. de. **Educação ambiental como instrumento de política pública: uma análise da gestão do lixo eletrônico na cidade de Belém-PA.** 2023. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local da Amazônia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2023.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic reviews in the social sciences: a practical guide.** Oxford: Blackwell Publishing, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9780470754887>.

PIRES, J. M. de A.; SILVA, J. L. G. da. **Logística Reversa: Uma Ferramenta Estratégica para o Desenvolvimento Sustentável.** Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 12, n. 5, 2017. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/2784>. Acesso em: 20 jul. 2025.

SANTOS, D. Y. S.; FRANÇA, M. L.; SANTOS, J. G. **A cultura do descarte: o uso e descarte do celular em Campina Grande,** p-4690-4704. In: Anais do 13º Congresso Pesquisa e Desenvolvimento em Design (2018). São Paulo: Blucher, 2019. ISSN 23186968, DOI: 10.5151/ped2018-5.3_ACO_02.

SANTIAGO, I. M. N.; OLIVEIRA, G. D.; PEREIRA, H. S.; BRILHANTE, A. K. V. C.; ROCHA, E. M. R. **Análise da gestão dos resíduos de equipamentos eletroeletrônicos**

(REEE) em João Pessoa/PB. In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade (CONGESTAS), V. 4., 2016. Ecogestão Brasil, 2016. ISSN 2318-7603.

SAP. **SAP Sustainability Control Tower.** Disponível em: <https://www.sap.com/products/sustainability.html>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SCIENTIFIC ELECTRONIC LIBRARY ONLINE (SciELO). **SciELO Brasil.** [S.l.], [199-]. Disponível em: <https://www.scielo.br/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

SILVA, G. G. N.; FONTANA, M. E.; NEPOMUCENO, V. S. **ARENA REEE: estratégia gamificada de ensino e aprendizagem sobre gestão de resíduos de equipamento eletroeletrônico.** In: XXIII Simpósio Brasileiro de Jogos e Entretenimento Digital (SBGames), 2024, Manaus.

SILVA, M. C.; CHAVES, M. R. M.; SIQUEIRA, M. V. B. M.; ANTONIASSI, B. **Educação ambiental voltada para a reutilização do cobre de baterias íon-lítio na determinação de proteínas.** Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science. p286-300. 2020. ISSN: 2238-8869. DOI: <http://dx.doi.org/10.21664/2238-8869.2020v9i3>.

SOUZA, E. C. S. O. de. **Conhecimento em Indústria 4.0 e práticas de economia circular: estudo de caso em uma rede de resíduos eletroeletrônicos.** 2020. Dissertação (Mestrado em Administração) - Universidade Paulista, São Paulo, 2020.

UNITAR. **The Global E-waste Monitor 2020.** United Nations Institute for Training and Research, 2020. Disponível em: https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/11/GEM_2020_def_july1_low.pdf. Acesso em: 27 jul. 2025.

WANG, Z.; WANG, Q.; CHEN, B.; WANG, Y. **Evolutionary game analysis on behavioral strategies of multiple stakeholders in E-waste recycling industry.** Resources, Conservation and Recycling, v. 155, 104618, abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104618>.

WEEE FORUM. **International E-waste Day: Of ~16 Billion Mobile Phones Possessed Worldwide, ~5.3 Billion will Become Waste in 2022.** 13 out. 2022. Disponível em:

https://weee-forum.org/ws_news/of-16-billion-mobile-phones-posessed-worldwide-5-3-billion-will-become-waste-in-2022/. Acesso em: 17 ago. 2025.

WORDART. **WordArt.com**: online word cloud art creator. [S.l.], c2025. Disponível em: <https://wordart.com/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

6 CAPÍTULO II

AraREEE: UMA SOLUÇÃO DE SOFTWARE BASEADA NA PARTICIPAÇÃO CIDADÃ ELETRÔNICA PARA O DESCARTE AMBIENTALMENTE ADEQUADO DE RESÍDUOS DE EQUIPAMENTOS ELETROELETRÔNICOS NO MUNICÍPIO DE ARAPIRACA-AL²

Wisnner Franklin dos Santos Silva

Instituto Federal de Alagoas (IFAL)

Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais (PPGTEC)

RESUMO

O presente estudo propõe o desenvolvimento da plataforma *AraREEE*, uma solução de *software* baseada em princípios de *e-participation*, voltada à gestão de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) no município de Arapiraca-AL. Frente ao aumento do consumo de dispositivos eletrônicos e à geração crescente de resíduos, a plataforma busca integrar cidadãos e gestores municipais, promovendo o descarte ambientalmente adequado e sistematizando dados relevantes para a gestão municipal. A construção do protótipo seguiu a *Design Science Research Methodology* (DSRM), garantindo que o artefato fosse ao mesmo tempo inovador, funcional e alinhado às necessidades locais. Entre os principais recursos, destacam-se o cadastro de usuários, informações dos ecopontos, agendamento de coletas e canais de denúncias sobre REEE, além de *dashboards* de *Business Intelligence* (BI) para monitorar métricas como fluxo de resíduos, engajamento de usuários e denúncias, oferecendo suporte à tomada de decisão estratégica pelos gestores municipais. Foi realizada uma pesquisa observacional em reuniões do COMDEMA de Arapiraca-AL com o intuito de verificar a utilidade do protótipo para comunicação entre gestão pública e cidadãos, além de fortalecer a responsabilidade ambiental coletiva.

PALAVRAS-CHAVES: Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE), *e-participation*, Logística Reversa, Gestão Ambiental, *Design Science Research Methodology* (DSRM)

² Artigo elaborado seguindo as normas da Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB). Disponível em: <<https://www.rbciamb.com.br/>>. QUALIS CAPES em Ciências Ambientais: A3

6.1 INTRODUÇÃO

O avanço acelerado do setor de tecnologia tem intensificado a obsolescência programada e o descarte precoce de equipamentos eletroeletrônicos, resultando no aumento contínuo dos Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE). Estima-se que, em 2023, tenham sido geradas mais de 62 milhões de toneladas de REEE no mundo, com taxa de reciclagem inferior a 20% (Baldé *et al.*, 2024). No Brasil, o quadro é particularmente desafiador, pois a coleta e a reciclagem formais permanecem incipientes, apesar da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pela Lei nº 12.305/2010 e que instituiu a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos (Brasil, 2010).

A gestão de REEE representa um desafio crescente para municípios de médio porte no Brasil frente ao aumento exponencial do consumo de dispositivos eletrônicos e à consequente geração de resíduos (Pires; Silva, 2017; Forti *et al.*, 2020). A destinação inadequada desses materiais acarreta impactos ambientais significativos, incluindo contaminação do solo e da água, além de desperdício de recursos valiosos presentes nos equipamentos (Pontes; Giordano, 2015; Baldé *et al.*, 2017). Nesse contexto, soluções tecnológicas capazes de apoiar a logística reversa e fomentar a participação cidadã surgem como ferramentas estratégicas para a sustentabilidade ambiental e a governança local (Wang *et al.*, 2020; Moraes *et al.*, 2021).

No contexto do Estado de Alagoas, as iniciativas de gestão de REEE possuem um potencial considerável de avanço, pois, com o crescimento das iniciativas de logística reversa, o crescente interesse nesse tema sinaliza uma oportunidade estratégica para o desenvolvimento econômico e social sustentável no estado. Já em Arapiraca-AL, município de médio porte do Estado de Alagoas, a gestão de REEE ainda é um problema a ser estudado (Silva *et al.*, 2021), pois o sistema formal de coleta seletiva na cidade leva ao descarte incorreto desses materiais, que, frequentemente, acabam em aterros sanitários.

Como observado por Silva *et al.* (2021), a logística reversa de resíduos sólidos urbanos (RSU) em Arapiraca-AL enfrenta desafios com os resíduos sendo centralizados no Centro de Tratamento de Resíduos (CTR) de Craíbas-AL. Embora a reciclagem já seja praticada na cidade, a efetivação de um sistema de logística reversa para materiais específicos, como pneus, pilhas, eletroeletrônicos e embalagens, ainda é deficiente, devido ao baixo número de ecopontos municipais, somente 4, onde é permitido o recebimento de REEE (Prefeitura de Arapiraca, 2023) os Pontos de Entrega Voluntária (PEVs) que são 33 no

município não podem receber resíduos eletroeletrônicos (Prefeitura de Arapiraca, 2020). A PNRS estabelece a responsabilidade compartilhada para a destinação final ambientalmente adequada, exigindo uma análise sistêmica abrangente para otimizar a recuperação de materiais e minimizar o impacto ambiental.

A superação dos desafios na gestão de REEE em Arapiraca-AL exige uma abordagem colaborativa e multifacetada. A prefeitura, por meio de políticas públicas, pode incentivar a coleta seletiva, estabelecendo uma rede de ecopontos em mais locais e promovendo campanhas de conscientização, assim como aumentando os tipos de materiais permitidos nas PEVs, visto que a população é orientada a não descartar REEEs, nem mesmo pilhas, baterias e lâmpadas nestes pontos (Prefeitura Arapiraca, 2020). Paralelamente, o setor privado, incluindo empresas e o comércio de eletrônicos, pode assumir a responsabilidade de se tornar pontos de coleta. A participação da população é igualmente crítica, exigindo educação para o descarte adequado de aparelhos em locais apropriados. Assim, a sinergia entre o poder público, o setor privado e os cidadãos é a chave para transformar a gestão de REEE em uma estratégia de desenvolvimento sustentável.

Nesse contexto, o presente estudo propõe a implementação de uma plataforma de *software*, denominada *AraREEE*, voltada ao gerenciamento de REEE em Arapiraca-AL, com base em princípios de *e-participation*. Decerto, soluções digitais baseadas em participação eletrônica despontam como alternativas promissoras para fomentar o engajamento social, a transparência e a efetividade da logística reversa. A literatura indica que plataformas digitais podem viabilizar processos de governança ambiental mais inclusivos, aproximando cidadãos e gestores (Medaglia, 2012). Persistem, contudo, lacunas quanto ao desenvolvimento e à aplicação de soluções específicas para REEE no Brasil.

A ferramenta proposta busca integrar cidadãos e gestores municipais, promovendo o descarte ambientalmente adequado e sistematizando informações relevantes para a gestão municipal. O desenvolvimento do protótipo seguiu a *Design Science Research Methodology (DSRM)*, metodologia reconhecida por sua capacidade de orientar a criação de artefatos inovadores que respondam a problemas práticos, assegurando relevância científica e aplicabilidade real.

A solução tecnológica baseou-se nos resultados da RSL do capítulo anterior e em observações não participantes no Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente (COMDEMA) do município de Arapiraca-AL, que é um órgão colegiado, paritário e

consultivo, criado pela Lei nº 3.040/2014 (Prefeitura de Arapiraca, 2014), e que tem sido fundamental para assessorar o Poder Executivo na formulação e execução da política ambiental do município. Sua estrutura reflete o princípio da gestão democrática e participativa, reunindo, em igualdade de número, representantes do Poder Público e da Sociedade Civil. Essa composição diversificada garante a pluralidade de perspectivas e a efetividade das decisões tomadas, promovendo uma abordagem intersetorial e abrangente das questões ambientais, como fica exposto na Lei nº 3.372/2019, que se baseia em princípios como a conscientização da população sobre a separação do lixo reciclável e não reciclável, visando promover a inclusão social (Prefeitura de Arapiraca, 2019).

Atualmente, o primeiro grupo do colegiado do COMDEMA é composto pelos representantes do Poder Público, incluindo 7 (sete) titulares e 7 (sete) suplentes de secretarias municipais e do Poder Legislativo, cujas competências se correlacionam com a temática ambiental. A inclusão de pastas como Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Desenvolvimento Social, Educação, Desenvolvimento Rural, Saúde e Serviços Públicos, bem como de um representante da Câmara Municipal, assegura a articulação entre as esferas executiva e legislativa. O segundo grupo, de representantes da Sociedade Civil, também é composto por 7 (sete) titulares e 7 (sete) suplentes e oferece a voz da comunidade e de entidades com expertise ou interesse nas questões ambientais, como instituições de ensino superior (IFAL, UFAL), entidades de classe (OAB), organizações sociais (Comitê de Bacia e Gestão dos Recursos Hídricos - CBH Coruripe, Associação de Mulheres do Brisa do Lago) e associações de trabalhadores (ASCARA). A presença de instituições do setor de serviços e capacitação profissional (SENAC) reforça o reconhecimento da importância de uma abordagem ampla para a agenda ambiental.

As reuniões do COMDEMA funcionam como fóruns deliberativos regulares, onde se discutem pautas ambientais. A frequência dos encontros evidencia a constância das atividades do conselho, que aborda temas como licenciamento ambiental, projetos de sustentabilidade, fiscalização e criação de normativas locais (Prefeitura de Arapiraca, 2014). As decisões tomadas nessas sessões são o resultado da análise e das contribuições de cada membro, refletindo o consenso e a expertise dos diversos setores representados.

Ao mesmo tempo, a pesquisa observacional identificou desafios, como a necessidade de atualização constante dos dados, barreiras de inclusão digital e dependência de recursos

tecnológicos e financeiros, ressaltando que o uso de tecnologia deve ser acompanhado de ações educativas e disponibilidade de infraestrutura de coleta mais robusta.

Figura 1 - Fluxo da logística reversa de REEE no contexto municipal.



Fonte: Elaboração própria a partir da Lei nº 3.372/2019, 2025.

O ecossistema de gestão de REEE (Figura 1), constituído por cidadãos e gestores municipais, apresenta desafios específicos que o protótipo busca enfrentar de forma integrada. Para os cidadãos, a solução deve oferecer um mecanismo prático e transparente de descarte, disponibilizando informações claras sobre pontos de coleta e evidenciando os benefícios ambientais decorrentes de sua participação. No âmbito do COMDEMA, o sistema deve funcionar como uma ferramenta eficaz para a gestão do fluxo de resíduos, assegurando conformidade com as normativas ambientais e promovendo a rastreabilidade dos materiais.

Dessa forma, o *AraREEE* transcende a concepção de uma mera ferramenta tecnológica, configurando-se como uma solução sistêmica voltada à coesão e à eficiência de toda a cadeia de valor dos resíduos eletroeletrônicos em Arapiraca. A proposta da solução *AraREEE* constitui-se como uma contribuição tanto científica quanto prática.

Metodologicamente, foi adotada a abordagem *DSRM* na criação dos artefatos tecnológicos voltados à sustentabilidade e ao *e-participation*, oferecendo um modelo replicável para outros municípios que enfrentam desafios semelhantes na gestão de REEE. Assim, a plataforma apresenta uma integração de tecnologia, participação cidadã e políticas públicas que podem fortalecer a governança ambiental, promover educação ambiental e tornar

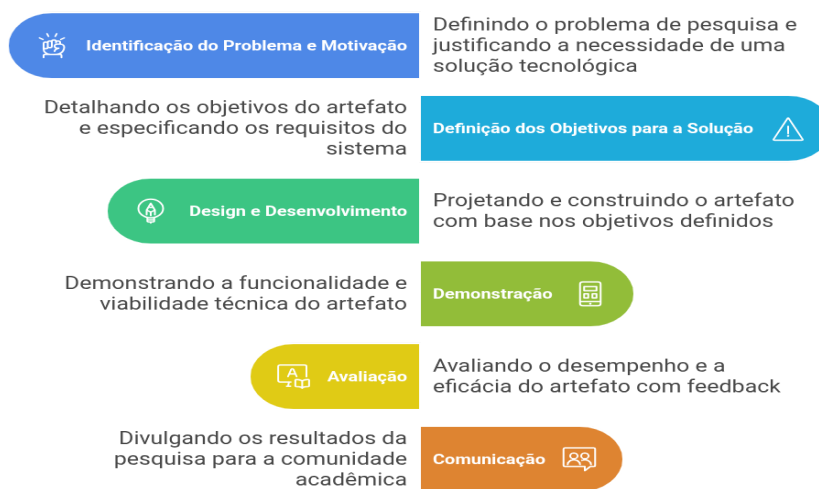
a logística reversa de resíduos eletroeletrônicos mais eficaz, alinhando-se às diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos e às melhores práticas internacionais.

6.2 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa é guiada pela abordagem da *Design Science Research Methodology (DSRM)*, que se concentra na criação e avaliação de artefatos inovadores com o objetivo de resolver problemas práticos e relevantes (Hevner *et al.*, 2004). Essa abordagem metodológica é particularmente adequada para o desenvolvimento de soluções em tecnologia da informação, pois consegue equilibrar o rigor científico com a busca por utilidade e aplicabilidade no mundo real (Peppers *et al.*, 2007). Assim, a pesquisa não se limita apenas à teoria, mas busca gerar uma solução concreta e eficaz.

A *DSRM* (Peppers *et al.*, 2007) serviu como guia para o desenvolvimento de uma solução de *software* focada na participação eletrônica, com o objetivo principal de aprimorar a logística de descarte de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) no município de Arapiraca/AL. A aplicação sistemática das fases da *DSRM* permite que o estudo ofereça uma contribuição dupla: prática, ao apresentar uma solução direta para o problema social e ambiental, e teórica, ao aprofundar o conhecimento sobre o uso de tecnologias digitais para a gestão de resíduos e a sustentabilidade. As atividades de pesquisa e desenvolvimento foram organizadas em um ciclo iterativo, seguindo as seis fases adaptadas da *DSRM* de Peppers *et al.* (2007), como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Processo de desenvolvimento de solução de gestão de resíduos.



Fonte: Elaboração própria a partir de Peppers *et al.* (2007), 2025.

- **Identificação do Problema e Motivação:** Esta fase inicial focou na definição do problema de pesquisa e na justificativa da necessidade de uma solução tecnológica. A análise da PNRS e a revisão da literatura sobre gestão de REEE e *e-participation* revelaram a lacuna existente e a necessidade de uma ferramenta para facilitar o descarte adequado desses resíduos.
- **Definição dos Objetivos para a Solução:** Com o problema identificado, foram detalhados os objetivos do artefato, especificando o que a solução de *e-participation* deveria fazer para apoiar o descarte de REEE. O resultado desta fase foi a definição clara dos requisitos funcionais e não funcionais do sistema.
- **Design e Desenvolvimento:** Nesta fase central, o artefato foi projetado e construído; com base nos objetivos definidos, foram elaborados o modelo de dados, a arquitetura de *software* e a *interface* do usuário. O protótipo funcional foi desenvolvido utilizando tecnologias e *frameworks* adequados para uma aplicação móvel, garantindo a viabilidade técnica da solução.
- **Demonstração:** A funcionalidade e a viabilidade técnica do artefato foram comprovadas através de demonstração do protótipo, utilizando cenários simulados que representaram as principais interações dos usuários (cidadãos e gestores municipais), mostrando como a solução aborda o problema de pesquisa.
- **Avaliação:** O desempenho e a eficácia do artefato foram avaliados, levando-se em consideração o *feedback* dos 3 membros do COMDEMA/Arapiraca, que trouxeram à luz a relevância e a utilidade da solução. Além disso, o teste de usabilidade *System Usability Scale (SUS)* foi conduzido, junto aos cidadãos, para avaliar a experiência do usuário e a facilidade de interação com a *interface*.
- **Comunicação:** A fase final consistiu na divulgação dos resultados da pesquisa para a comunidade acadêmica e na formalização da propriedade intelectual do artefato. Além da dissertação, que detalha o processo metodológico e a avaliação do sistema, procedeu-se à preparação para o registro do *software AraREEE* junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI).

A coleta de dados iniciou-se com a análise de documentos legais e normativos, como a PNRS e regulamentos municipais sobre a questão ambiental em Arapiraca-AL. Uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) também foi realizada para aprofundar a base teórica. Essa análise foi fundamental para justificar a necessidade da solução e definir os requisitos do sistema. O desenvolvimento do protótipo foi usado como método de coleta de dados e

validação, permitindo que suas funcionalidades e usabilidade fossem testadas e refinadas iterativamente. A ênfase na prototipação como método de validação inicial é uma estratégia metodológica comum, justificada pela dificuldade de acesso a ambientes de produção e usuários finais em tempo integral.

A prototipação da plataforma priorizou a construção de uma *interface* intuitiva e responsiva, acessível em múltiplos dispositivos, com funcionalidades específicas para cada grupo de usuários. Entre os principais recursos, destacam-se o cadastro de usuários, informações dos ecopontos, agendamento de coletas e canais de denúncias sobre REEE. Para garantir a gestão eficiente dos dados coletados, o estudo sugeriu a implementação de *dashboards* de *Business Intelligence (BI)*, integrados ao *backend* em nuvem da plataforma, utilizando a ferramenta *Google Looker Studio*. Esses *dashboards* permitem aos gestores públicos e ambientais monitorar métricas-chave sobre fluxo de resíduos, denúncias e número de usuários cadastrados na plataforma, apoiando a formulação de políticas públicas baseadas em dados e promovendo maior transparência e governança digital.

6.2.1 Pesquisa observacional e análise do contexto local

Como etapa fundamental do Ciclo de Relevância da *Design Science Research Methodology*, conduziu-se uma investigação empírica qualitativa através de pesquisa observacional não-participante. Acompanhou-se três reuniões ordinárias do Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente de Arapiraca-AL, realizadas em 06 de fevereiro, 10 de abril e 14 de agosto de 2025.

A escolha por este método justifica-se pela necessidade de compreender, *in loco*, como as políticas públicas ambientais são hierarquizadas pelos gestores municipais e representantes da sociedade civil. O papel do pesquisador restringiu-se à observação e registro das pautas, sem intervenção direta nos debates, com o objetivo de captar a realidade da governança ambiental local sem enviesar os resultados. Essa imersão teve como propósito identificar lacunas comunicacionais e gerenciais que pudessem ser solucionadas ou mitigadas pelo artefato tecnológico proposto *AraREEE*, validando os requisitos funcionais do sistema frente à ausência de dados estruturados nas deliberações do conselho.

6.2.2 Prototipação da solução

O desenvolvimento do protótipo da solução “*AraREEE*” para a gestão de REEE em Arapiraca-AL foi conduzido metodologicamente de maneira rigorosa, sustentada pelos princípios da Engenharia de *Software* e pela cientificidade da *DSRM*. A *DSRM*, em especial, oferece um referencial estruturado para a criação do artefato capaz de responder ao problema de forma prescritiva e inovadora. Nesse sentido, o protótipo é concebido não como produto acabado, mas como artefato incremental, cujo processo iterativo de construção e validação favorece o aprimoramento contínuo e a adaptação às condições reais. O foco em usabilidade e experiência do usuário constitui elemento essencial para assegurar a aceitação e a efetividade da solução em um ambiente caracterizado pela complexidade e pela necessidade de engajamento de diversos atores.

O desenvolvimento do protótipo teve como objetivo principal servir como um modelo validado através do teste *SUS*, capaz de evidenciar a funcionalidade e a eficácia de um sistema de gestão de REEE; a etapa de validação constituiu um momento importante, pois possibilitou a detecção e correção de falhas de concepção e operação, contribuindo para a mitigação de riscos. Sendo assim, a prototipagem não se restringiu à elaboração de *interfaces* e funcionalidades, mas configurou-se como ferramenta de investigação destinada a testar possibilidades acerca do papel da tecnologia na promoção da interação e da cooperação entre os diferentes atores do ecossistema de resíduos. O enfoque na usabilidade assegura que a solução seja intuitiva e acessível, estimulando o engajamento de cidadãos e COMDEMA, agentes essenciais para a logística reversa e para o ciclo de valorização dos REEE.

No âmbito do COMDEMA, o sistema deve funcionar como uma ferramenta eficaz para a gestão do fluxo de resíduos, assegurando conformidade com as normativas ambientais e promovendo a rastreabilidade dos materiais, apoiando a organização das atividades, otimizando rotas de coleta e valorizando sua função estratégica na economia circular. Dessa forma, o *AraREEE* transcende a concepção de uma mera ferramenta tecnológica, configurando-se como uma solução sistêmica voltada à coesão e à eficiência de toda a cadeia de valor dos resíduos eletroeletrônicos em Arapiraca.

6.2.3 Requisitos funcionais

A prototipagem do *AraREEE* foi direcionada para o desenvolvimento de uma plataforma responsiva, concebida a partir de um *design* centrado no usuário, contemplando um conjunto de requisitos funcionais considerados essenciais para viabilizar a participação eletrônica e o gerenciamento eficiente dos resíduos, resultando em funcionalidades específicas voltadas à interação entre os diferentes atores envolvidos no processo (Figura 3).

Figura 3 - Modelo da proposta de solução de *software*.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

A solução permite a navegação e o acesso às suas funcionalidades sem a necessidade de um cadastro prévio. No entanto, para utilizar o recurso de agendamento de serviços de coleta, o registro de usuário se torna obrigatório, visto que devem ser disponibilizados local e dias para coleta, concebido como uma resposta direta ao problema do descarte irregular, ao oferecer um canal formal e organizado para o encaminhamento dos materiais. Complementarmente, a integração de informações de horário e localização dos ecopontos constitui um elemento-chave para otimizar a logística reversa e facilitar o descarte ambientalmente adequado, funcionando como uma ferramenta visual que conecta a infraestrutura disponível às necessidades da população. O sistema incorpora ainda um canal de denúncias, por meio do qual o cidadão é convertido em agente de fiscalização social, contribuindo para o monitoramento das políticas públicas e para a inibição de práticas ilegais relacionadas ao descarte inadequado. O Quadro 1 abaixo resume as principais funcionalidades da solução.

Quadro 1 - Funcionalidades da solução proposta.

Requisitos funcionais	Evidências do campo e da literatura	Perfis de usuários
Cadastrar usuários	Resultados da RSL (O sistema de cadastro é uma resposta ao problema de segmentação de perfis para controle de acesso e agendamento)	Cidadãos
Agendar coletas de REEE	Resultados da RSL (Refere-se à necessidade de um canal formal para descarte, identificada na pesquisa)	Cidadãos
Localizar ecopontos	Pesquisa observacional no COMDEMA (A necessidade de otimizar a logística foi um ponto-chave observado na prática)	Cidadãos
Denunciar práticas de descarte irregular	Resultados da RSL e Legislação ambiental (A legislação brasileira, como a PNRS, incentiva a participação social na fiscalização)	Cidadãos
Gerenciar o fluxo de REEE a partir das informações dos cidadãos	Resultados da RSL (A necessidade de gestão estruturada do fluxo de REEE foi um dos problemas centrais identificados)	COMDEMA

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

6.2.4 Requisitos não funcionais

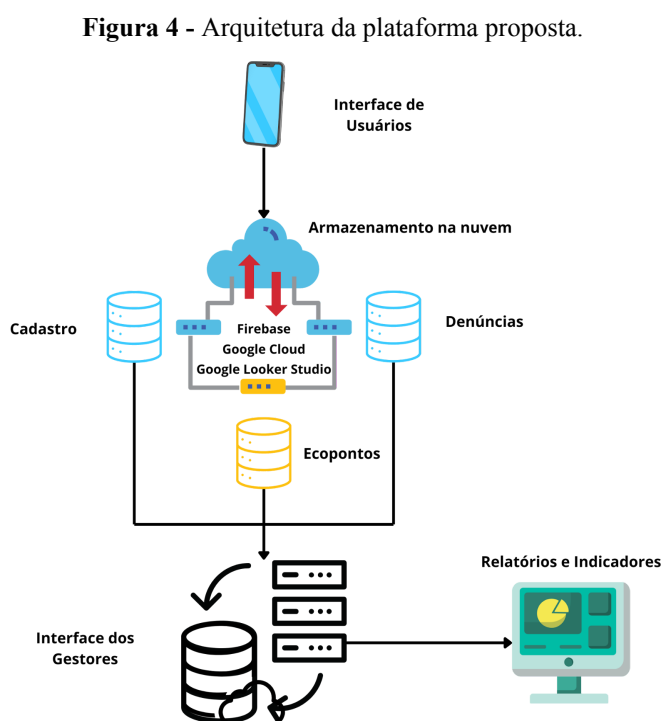
Para assegurar que a plataforma *AraREEE* atendesse às funcionalidades esperadas e também se mantivesse eficaz e sustentável, foram incorporados requisitos não funcionais considerados essenciais ao seu desenvolvimento. Entre eles, destaca-se a usabilidade intuitiva, concebida para garantir acessibilidade a um público heterogêneo, com diferentes níveis de familiaridade tecnológica. A disponibilidade de uma plataforma *mobile* constitui um aspecto fundamental, uma vez que essa concepção amplia o alcance da solução e facilita sua utilização em diferentes dispositivos. Ademais, a segurança e a privacidade de dados configuram-se como requisitos mandatórios, indispensáveis para a proteção das informações sensíveis e para o fortalecimento da confiança do usuário. Neste contexto, a concepção do *AraREEE* adotou o princípio de *Privacy by Design*, alinhando-se às diretrizes da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD - Lei nº 13.709/2018). A estrutura de dados foi modelada para permitir, mediante solicitação administrativa, a identificação e a exclusão ou anonimização das informações pessoais, garantindo que o direito do titular possa ser exercido sem comprometer a integridade do banco de dados.

Para operacionalizar o direito de exclusão e revogação de consentimento, previstos no Art. 18 da LGPD, a plataforma *AraREEE* implementará uma funcionalidade dedicada no

módulo de “Perfil do Usuário”. Tecnicamente, ao solicitar a exclusão da conta, o aplicativo acionará uma instrução direta à *API do Firebase Authentication* para remover as credenciais de acesso do cidadão. Simultaneamente, será executada uma rotina no banco de dados (*Cloud Firestore*) para desvincular os dados pessoais (como nome, e-mail e endereço) dos registros de cadastro de usuários, garantindo a anonimização das informações para fins estatísticos, preservando o dado de volume de resíduo coletado, mas removendo a autoria, assegurando assim o cumprimento integral do direito ao esquecimento sem comprometer a integridade histórica dos dados ambientais do município.

6.2.5 Arquitetura da solução proposta

A arquitetura da solução foi concebida como uma aplicação híbrida, conectada a um servidor central e sustentada por um banco de dados em nuvem. Para o desenvolvimento do aplicativo, optou-se pelo uso do *Kodular*, plataforma que possibilita a prototipagem ágil de *interfaces* e fluxos lógicos para dispositivos móveis. Complementarmente, o *Firebase* foi adotado como solução de *backend* e gerenciamento de banco de dados em nuvem, oferecendo recursos robustos de autenticação, armazenamento e sincronização de dados em tempo real, elementos que asseguram escalabilidade, confiabilidade e integração contínua da plataforma (Figura 4).



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

O monitoramento e a gestão eficiente dos dados coletados pela plataforma *AraREEE* dependem da criação de *dashboards* de gestão, capazes de apresentar métricas-chave sobre o fluxo de REEE, o número de denúncias registradas e o engajamento dos usuários. Tais *dashboards* oferecem aos gestores públicos e ambientais uma visão consolidada e estratégica das operações, possibilitando tomadas de decisão fundamentadas em dados concretos.

Considerando a arquitetura baseada em nuvem e a necessidade de integração com serviços de dados, recomendou-se a utilização de plataformas de *Business Intelligence (BI)* compatíveis com o *Firebase* ou outros bancos de dados em nuvem. Entre as opções, optou-se pelo *Google Looker Studio* (anteriormente *Google Data Studio*), ferramenta gratuita e robusta que permite a criação de *dashboards* interativos e relatórios personalizados, especialmente indicada para projetos que já utilizam o ecossistema *Google Cloud*. Em suma, o ferramental que foi adotado para o desenvolvimento tecnológico encontra-se no quadro abaixo.

Quadro 2 - Ferramentas utilizadas para solução.

Ferramenta	Plataforma / Provedor	Finalidade
<i>Figma</i>	Plataforma em nuvem / https://www.figma.com	Ferramenta de design e prototipagem de interfaces. Utilizada para a concepção e visualização da experiência do usuário (UX) e da interface do usuário (UI) da solução.
<i>Kodular</i>	Plataforma web / https://www.kodular.io/	Ambiente de programação visual baseado em blocos. Utilizado para o desenvolvimento rápido do protótipo do aplicativo, facilitando a construção da lógica e da interface de forma intuitiva.
<i>Firebase</i>	Plataforma em nuvem / https://firebase.google.com	Plataforma de desenvolvimento de aplicativos do <i>Google</i> , utilizada para gerenciar o <i>backend</i> da solução, incluindo banco de dados em tempo real, autenticação de usuários e hospedagem.
<i>Google Cloud</i>	Plataforma em nuvem / https://cloud.google.com	Plataforma de computação em nuvem do <i>Google</i> . Utilizada para fornecer a infraestrutura necessária para o armazenamento de dados e a execução de serviços complementares à solução.
<i>Google Looker Studio</i>	Plataforma em nuvem / https://lookerstudio.google.com	Ferramenta de visualização e business intelligence. Utilizada para criar relatórios e painéis dinâmicos, permitindo a análise e o monitoramento dos dados coletados pela solução.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

6.2.6 Instrumento de avaliação de usabilidade: *system usability scale (sus)*

Para a validação quantitativa do artefato "AraREEE", optou-se pela aplicação do *System Usability Scale (SUS)*, desenvolvido originalmente por Brooke em 1986 e publicado posteriormente (Brooke, 1996). O *SUS* é reconhecido na literatura como um questionário altamente confiável, para avaliar a usabilidade de sistemas, *softwares* e *interfaces* digitais. A escolha deste instrumento justifica-se pela sua capacidade de fornecer uma visão global da usabilidade subjetiva, abrangendo critérios de eficácia, eficiência e satisfação do usuário, mesmo em amostras de teste reduzidas, por ser uma ferramenta robusta e versátil sendo uma escala rápida e econômica de usabilidade (Brooke, 1996).

O método de aplicação consistiu na apresentação do protótipo funcional aos usuários alvo (cidadãos de Arapiraca e membros do COMDEMA). Após a realização de tarefas no aplicativo, os participantes responderão ao questionário composto por 10 afirmações que podem ser vistas na Tabela 1. O instrumento utiliza uma escala *Likert* de 5 pontos, variando de "Discordo Totalmente" (1) a "Concordo Totalmente" (5).

Tabela 1 – Instrumento de avaliação de usabilidade (*SUS*) adaptado para o AraREEE.

Item	Afirmação	Escala (1 a 5)*
1	Eu acho que gostaria de usar o AraREEE com frequência.	1 2 3 4 5
2	Eu achei o AraREEE desnecessariamente complexo.	1 2 3 4 5
3	Eu achei o AraREEE fácil de usar.	1 2 3 4 5
4	Eu acho que precisaria de suporte técnico para conseguir usar o AraREEE.	1 2 3 4 5
5	Eu achei que as várias funções do AraREEE estavam muito bem integradas.	1 2 3 4 5
6	Eu achei que havia muita inconsistência no AraREEE.	1 2 3 4 5
7	Eu imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar o AraREEE muito rapidamente.	1 2 3 4 5
8	Eu achei o AraREEE muito atrapalhado/pesado de usar.	1 2 3 4 5
9	Eu me senti muito confiante usando o AraREEE.	1 2 3 4 5
10	Eu precisei aprender muitas coisas antes de conseguir lidar com o AraREEE.	1 2 3 4 5

*Legenda: 1 - Discordo Totalmente; 2 - Discordo; 3 - Neutro; 4 - Concordo; 5 - Concordo Totalmente.

Fonte: Adaptado de Brooke (1996).

6.2.6.1 Cálculo do *score sus*

O cálculo do *score* final do *SUS* segue um protocolo específico para normalizar os resultados em uma escala de 0 a 100. É importante ressaltar que o valor final não representa uma porcentagem, mas sim uma pontuação composta. A fórmula de cálculo processa-se da seguinte maneira:

1. **Para os itens ímpares (positivos):** Subtrai-se 1 da pontuação dada pelo usuário (Resposta - 1).
2. **Para os itens pares (negativos):** Subtrai-se a pontuação dada pelo usuário de 5 (5 - Resposta).
3. **Score Final:** A soma dos valores calculados para os 10 itens é multiplicada por 2,5.

$$SUS_{Score} = \left(\sum(\text{Ímpares} - 1) + \sum(5 - \text{Pares}) \right) \times 2,5$$

Com base na escala de classificação de Bangor *et al.* (2009), um *score* acima de 68 é considerado acima da média, indicando uma boa usabilidade. *Scores* acima de 80 indicam excelência na *interface* do usuário. Para fins de análise da viabilidade, a interpretação dos resultados obedece às seguintes faixas de classificação, que correlacionam a nota obtida com o comportamento esperado do cidadão:

- **Faixa de Excelência (80,1 a 100 - Grau A):** Representa uma *interface* fluida e rápida, onde a interação é considerada prazerosa e sem atritos.
- **Faixa de Sucesso (69 a 80 - Grau B):** Classificada como “Muito Bom”, indica que o sistema é intuitivo e que a maioria da população consegue realizar o agendamento ou denúncia sem necessitar de suporte técnico ou ajuda de terceiros.
- **Faixa Marginal (51 a 67 - Graus C e D):** Uma zona de alerta onde a usabilidade é comprometida. Neste nível, o usuário enfrenta confusão na navegação ou exige alto esforço cognitivo para localizar funções básicas, o que pode gerar reclamações ou uso apenas sob obrigatoriedade.
- **Faixa Inaceitável (0 a 50 - Grau F):** Considerada crítica. Um *score* neste patamar indica que a *interface* frustra o usuário a ponto de levá-lo à desistência. No contexto da gestão de resíduos, isso representaria o fracasso da política pública, pois o cidadão provavelmente abandonaria o aplicativo e realizaria o descarte do lixo em local incorreto.

6.3 RESULTADOS

Como resultado definido do processo de desenvolvimento, a solução foi estruturada em duas etapas complementares de engenharia de *software*. Inicialmente, a concepção visual e a arquitetura de informações foram prototipadas na ferramenta *Figma*, assegurando que a construção das interfaces priorizasse a acessibilidade, a clareza e a usabilidade. Subsequentemente, a implementação funcional do aplicativo foi realizada na plataforma *Kodular*, permitindo a materialização do Produto Técnico Tecnológico (PTT) fruto desta dissertação em um ambiente operacional robusto e replicável.

Essa abordagem técnica visou garantir que diferentes perfis de usuários interajam com o sistema de forma intuitiva, reduzindo barreiras de entrada. Tal característica é fundamental, visto que a pesquisa observacional realizada no COMDEMA indicou que as atuais lacunas de comunicação entre a gestão municipal e os cidadãos enfraquecem o senso de responsabilidade ambiental coletiva. Desta forma, o artefato tecnológico desenvolvido atua diretamente na mitigação desse distanciamento, promovendo uma interação prática e efetiva com os serviços de logística reversa de REEE.

As visitas nas reuniões do COMDEMA que ocorreram em 2025 permitiu a observação de que as pautas ambientais prioritárias ainda não incluem a discussão aprofundada sobre os REEE. O foco do debate estava, em sua maioria, em questões como o plantio de árvores e a arborização urbana, evidenciando que o REEE ainda é tratado, de forma geral, como resíduo sólido comum. Essa percepção reforça a carência de uma agenda formalizada para o tema, o que acarreta prejuízos para todos os setores, desde a perda de materiais valiosos até os impactos ambientais e de saúde pública do descarte inadequado. Revelando um distanciamento significativo entre a urgência da gestão de resíduos tecnológicos e as prioridades políticas locais. Com base na análise das reuniões, elaborou-se o Quadro 3 para sintetizar os achados da pesquisa observacional, Servindo como um resumo visual dos dados empíricos coletados.

Quadro 3 - Síntese das Observações nas Reuniões do COMDEMA (2025).

Reunião	Pautas Principais Debatidas	Principais Observações	Implicações para a Pesquisa e para o Artefato <i>AraREEE</i>
Fevereiro/2025	Arborização urbana e plantio de árvores.	Ausência total de debate estruturado sobre REEE;	Validação da premissa de invisibilidade dos fluxos de

		tratamento destes resíduos como "lixo comum" sem distinção de periculosidade.	resíduos especiais na agenda pública, justificando a necessidade de uma ferramenta que gere dados específicos.
Abril/2025	Relatório financeiro do Fundo Municipal e criação da Comissão de Proteção Animal.	Existência de recursos financeiros (saldo > R\$77 mil), mas sem dotação para logística reversa. Priorização da pauta animal em detrimento da gestão de resíduos perigosos.	Evidência de que a falta de investimento não é por escassez de recursos, mas por falta de pressão estruturada e projetos, corroborando a necessidade de sistemas de informação.
Agosto/2025	Posse de conselheiros, eleição da diretoria e formação de Câmaras Técnicas.	Foco em trâmites burocráticos. Criação de Câmaras Técnicas generalistas ("Meio Físico", "Biótico") sem especificidade para resíduos sólidos ou tecnológicos.	A estrutura generalista do conselho carece de subsídios técnicos. O <i>AraREEE</i> se posiciona como ferramenta externa essencial para municiar essas Câmaras com dados georreferenciados sobre descarte irregular.

Fonte: Elaborado pelo autor com base nas atas do COMDEMA (2025).

Nesse contexto, a solução de *software* proposta demonstra seu valor social; ao sistematizar dados e incentivar a participação no descarte correto, a plataforma pode gerar informações quantitativas e qualitativas essenciais sobre o fluxo de REEE no município. Tais dados podem, então, ser apresentados ao COMDEMA para embasar futuras discussões e elevar a urgência da pauta, transformando a gestão de REEE de um problema secundário para uma prioridade na agenda ambiental do município.

As observações realizadas durante as visitas no COMDEMA possibilitaram articular temas centrais à gestão de resíduos com a proposição de uma solução de *software*, fundamentada em evidências e necessidades amplamente discutidas na literatura e na legislação pertinente. As evidências identificadas no Quadro 4, provenientes das discussões na reunião do COMDEMA, justificam a construção de uma plataforma de *e-participation* no município de Arapiraca-AL, que visa a uma gestão mais eficiente e transparente dos REEE.

Quadro 4 - Principais evidências do COMDEMA de Arapiraca-AL relacionadas a REEE.

Tema discutido	Descrição da pauta	Relevância para a pesquisa
Falta de pontos de coleta	Ausência de infraestrutura municipal para recebimento de REEE.	Identifica necessidade de mapa georreferenciado.
Descarte irregular	Registro de casos frequentes de descarte em aterro ou terrenos baldios.	Fundamenta criação do canal de denúncia na plataforma.

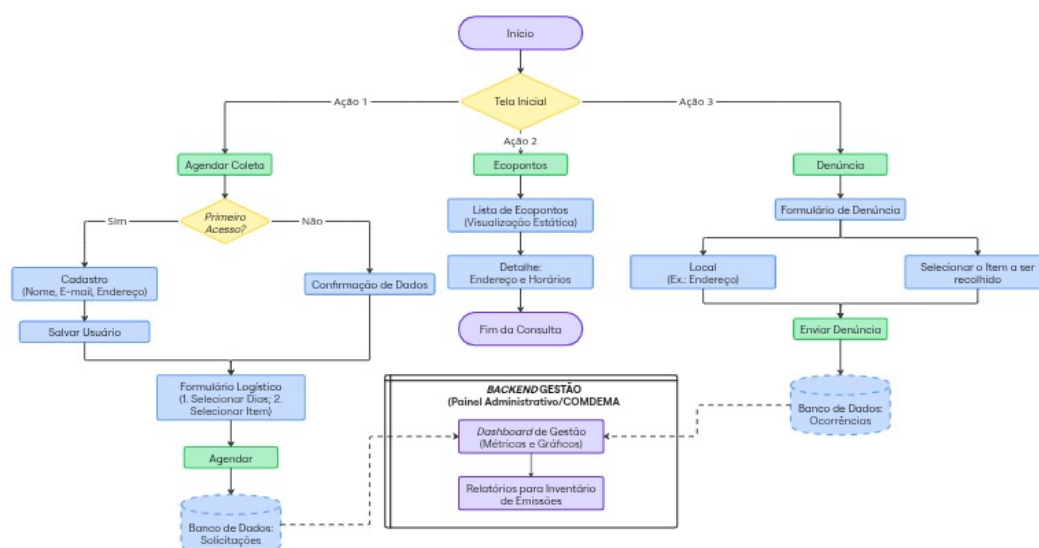
Parcerias público-privadas	Discussões sobre a responsabilidade das empresas locais.	Alinha-se ao princípio da responsabilidade compartilhada.
Limitações técnicas do Conselho	Falta de ferramentas digitais para comunicação com a sociedade.	Justifica a construção da plataforma de <i>e-participation</i> .

Fonte: Elaboração própria a partir de visitas técnicas ao COMDEMA, 2025.

A fase de desenvolvimento culminou na concretização dos requisitos funcionais e não funcionais em *interfaces* de alta fidelidade, consolidando a arquitetura da informação do sistema. Contudo, o processo de prototipagem ultrapassou a dimensão puramente técnica para incorporar os princípios fundamentais do *Design Centrado no Usuário (User-Centered Design)*. Sob essa ótica, a *interface* foi cuidadosamente projetada para reduzir a carga cognitiva do cidadão, priorizando a clareza visual, o contraste adequado e a eliminação de elementos supérfluos. Essa abordagem buscou assegurar a acessibilidade e, primordialmente, mitigar as barreiras impostas pelo baixo letramento digital, garantindo que a complexidade tecnológica do *backend* permanecesse invisível ao usuário final.

Consequentemente, o fluxo de navegação foi estruturado de maneira estritamente linear e sequencial, evitando ramificações que pudessem causar desorientação. O Fluxograma de Navegação (Figura 5) sistematiza essa jornada simplificada, estratégia adotada para eliminar a complexidade de uso do protótipo, conduzindo o usuário diretamente ao menu de serviços e encerra-se com *feedbacks* visuais imediatos de confirmação da solicitação, garantindo a completude da tarefa com o mínimo de interações possível.

Figura 5 - Fluxograma de navegação e arquitetura do *AraREEE*.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

Assim, as *interfaces* foram consolidadas e o desenvolvimento resultou em um aplicativo móvel funcional, cuja arquitetura de *interface* foi projetada para reduzir barreiras de letramento digital. A Figura 6 ilustra a Tela Inicial, que atua como o *hub* central da experiência do usuário. Nela, destaca-se a arte conceitual do aplicativo, que reforça a identidade visual e a proposta de valor sustentável do projeto. Logo abaixo, a navegação é simplificada por meio de três botões de ação intuitivos: Agendar Coleta, Ecopontos e Denúncia.

Esta disposição estratégica permite que o cidadão seja direcionado instantaneamente aos respectivos compartimentos de aplicação de cada funcionalidade, garantindo acesso imediato aos serviços de logística reversa e fiscalização ambiental.

Figura 6 - Tela Inicial



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

Para a Tela de Agendamento Figura 7, o fluxo foi estruturado para garantir a integridade dos dados sem comprometer a agilidade. Ao selecionar o botão de ação (Agendar Coleta), o usuário é redirecionado inicialmente a uma interface de registro simplificado. Nesta etapa, a barreira de entrada é minimizada, solicitando-se apenas três informações cadastrais essenciais: nome, *e-mail* e endereço físico.

Após a submissão desses dados deve-se dar o comando (Salvar), o sistema conduz o cidadão à etapa seguinte, onde ocorre a validação da identidade mediante a confirmação do *e-mail* cadastrado, as informações são enviadas ao banco de dados para gerar a tela principal

de acompanhamento dos gestores do COMDEMA (Apêndice A). Uma vez autenticado, habilita-se o formulário logístico, permitindo ao usuário selecionar as janelas temporais de sua preferência (dias para coleta) e tipificar o resíduo a ser descartado a partir de uma lista de itens pré-definida. O processo é concluído ao acionar o botão Agendar, momento em que a solicitação é efetivamente processada e persistida no banco de dados, onde o mesmo se comunicará com *Google Looker* gerando a tela coleta no painel de gestão do COMDEMA (Apêndice B).

Figura 7 - Tela de Agendamento.

The image displays two mobile application screens for 'AraREEE'. The left screen, titled 'REGISTRAR-SE', features a registration form with input fields for 'E-MAIL', 'NOME', and 'ENDEREÇO'. Below these fields are two buttons: 'SALVAR' and 'AGENDAMENTO'. A link 'Já sou cadastrado' is also present. The right screen, titled 'AGENDAMENTO DE COLETA', shows a form for scheduling waste collection. It includes an 'E-MAIL' field, a 'BUSCAR' button, and an 'ENDEREÇO DA COLETA' section with sub-fields for 'MAIL:', 'NOME:', and 'ENDEREÇO:'. Below this is a 'COLETA' section with a 'PERÍODOS DE DISPONIBILIDADE' calendar (showing days 0-6) and a note 'SELECIONE OS DIAS EM QUE OS REEE'S PODEM SER COLETADOS'. A dropdown menu for 'ITEM A SER COLETADO' and an 'AGENDAR' button complete the form. Both screens have a hamburger menu icon at the bottom.

Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

Ao acessar o módulo Ecopontos a partir da tela inicial, o usuário é direcionado a uma *interface* informativa que cataloga os ecopontos disponíveis no município. A apresentação dos dados ocorre em formato de listagem detalhada, fornecendo informações essenciais como o endereço físico e os horários de funcionamento de cada unidade (Figura 8).

Importante ressaltar que, nesta versão do protótipo, a integração com *APIs* de geolocalização e mapas dinâmicos foi temporariamente suprimida. Esta decisão projetual teve como objetivo otimizar o desempenho do aplicativo, reduzindo a carga de processamento (*overhead*) requerida para a renderização de mapas em tempo real, garantindo assim a fluidez da navegação mesmo em dispositivos com *hardware* limitado. A funcionalidade de mapa interativo permanece mapeada como uma atualização prioritária para as futuras iterações da plataforma.

Figura 8 - Ecopontos.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

A plataforma permite que o cidadão através do módulo de Denúncia (Figura 9) instrumentalize o exercício da cidadania, permitindo que o usuário atue diretamente na fiscalização ambiental do município. Ao acessar esta funcionalidade, o cidadão é direcionado a uma *interface* dedicada ao reporte de infrações, especificamente o descarte de REEE em locais ambientalmente sensíveis ou inadequados (nascentes, terrenos baldios ou misturados ao lixo domiciliar comum). Para efetivar o registro da ocorrência, o *design* da tela priorizou a agilidade: o sistema solicita a entrada manual da localização (descrição textual do local onde o resíduo foi avistado) e a categorização do item denunciado através de um menu de seleção. Após isso, a informação gerada é armazenada e disponibilizada na tela de denúncia dos gestores do COMDEMA (Apêndice C). Essa estrutura simplificada visa remover barreiras burocráticas, incentivando o envio rápido de alertas sobre passivos ambientais urbanos.

Figura 9 - Tela de Denúncia.



Fonte: Elaborada pelo próprio autor, 2025.

Finalizada a estruturação dos módulos operacionais e a definição da *interface* do usuário, o ciclo da pesquisa avançou para a etapa de Demonstração e Avaliação. O objetivo desta fase foi verificar a aderência do artefato tecnológico às demandas reais da governança ambiental local, transcendendo a validação técnica para buscar a validação política e gerencial da solução. Nesse contexto, realizou-se uma sessão de demonstração do protótipo funcional junto a três conselheiros, através do *Dashboard* de Gestão (Anexos A, B e C). Durante a apresentação do protótipo aos membros do COMDEMA, foram registrados os *feedbacks* e percepções dos gestores quanto à aplicabilidade da ferramenta no cotidiano da administração pública. A dinâmica permitiu identificar como cada módulo do sistema poderia auxiliar na superação dos entraves burocráticos observados nas reuniões anteriores.

A seleção dos gestores participantes ocorreu por meio de uma amostragem por critérios de adesão. Foram incluídos na análise os representantes que, após o contato inicial, demonstraram prontidão no atendimento e forneceram respostas integrais aos instrumentos de coleta, contribuindo com *feedbacks* detalhados para o refinamento do artefato. O Quadro 5 sistematiza as opiniões coletadas, categorizadas por funcionalidade, correlacionando a visão técnica dos conselheiros com as potencialidades de uso do aplicativo para o fortalecimento da gestão de resíduos em Arapiraca.

Quadro 5 - Matriz de Opiniões dos Gestores do COMDEMA sobre o *AraREEE*.

Funcionalidade Apresentada	Gestor 1	Gestor 2	Gestor 3
<i>Dashboard</i> de Gestão (Métricas de coleta e relatórios)	"Essencial para as Câmaras Técnicas. Pela primeira vez teremos dados brutos para compor o inventário de emissões e monitorar as metas do plano municipal."	"A visualização dos dados ajuda a justificar a alocação de caminhões. Se o gráfico mostra aumento em um bairro, deslocamos a equipe para lá."	"Excelente ferramenta de transparência. Podemos usar esses relatórios nas audiências públicas para prestar contas à sociedade sobre o que está sendo feito."
Módulo de Denúncia (Localização de descartes irregulares)	"A localização permite criar mapas de calor (<i>heatmaps</i>) das áreas críticas, permitindo um planejamento urbano preventivo e não apenas reativo."	"Transforma o cidadão em um fiscal. Isso otimiza nosso tempo e combustível, pois a equipe já sai da base sabendo exatamente onde está o REEE, com endereço."	"Empodera a comunidade. O cidadão sente que faz parte da solução. Porém, a prefeitura precisa garantir que vai atender a denúncia rápido para não frustrar o usuário."
Lista de Ecopontos (Informações de endereços e horários)	"Ajuda a identificar vazios assistenciais. Olhando a lista e os endereços, fica claro quais regiões da cidade ainda estão descobertas por pontos de entrega."	"Resolve um problema diário de atendimento telefônico. Muita gente liga só para perguntar onde deixar o lixo eletrônico. O <i>app</i> elimina essa demanda."	"É fundamental manter esses dados atualizados. Se o cidadão for até o local e estiver fechado, perderemos a credibilidade da ferramenta."
Agendamento de Coleta (Cadastro e solicitação de retirada)	"Cria rastreabilidade. Sabemos quem gerou, o que gerou e quando foi coletado, garantindo a documentação necessária para a logística reversa legal."	"Organiza a rota do caminhão. Em vez de rodar aleatoriamente, a cooperativa já sai com o itinerário pronto, economizando tempo e recursos."	"Moderniza o serviço público. Traz a gestão de resíduos para a era digital, facilitando a vida de quem não tem tempo de ir até um ecoponto."

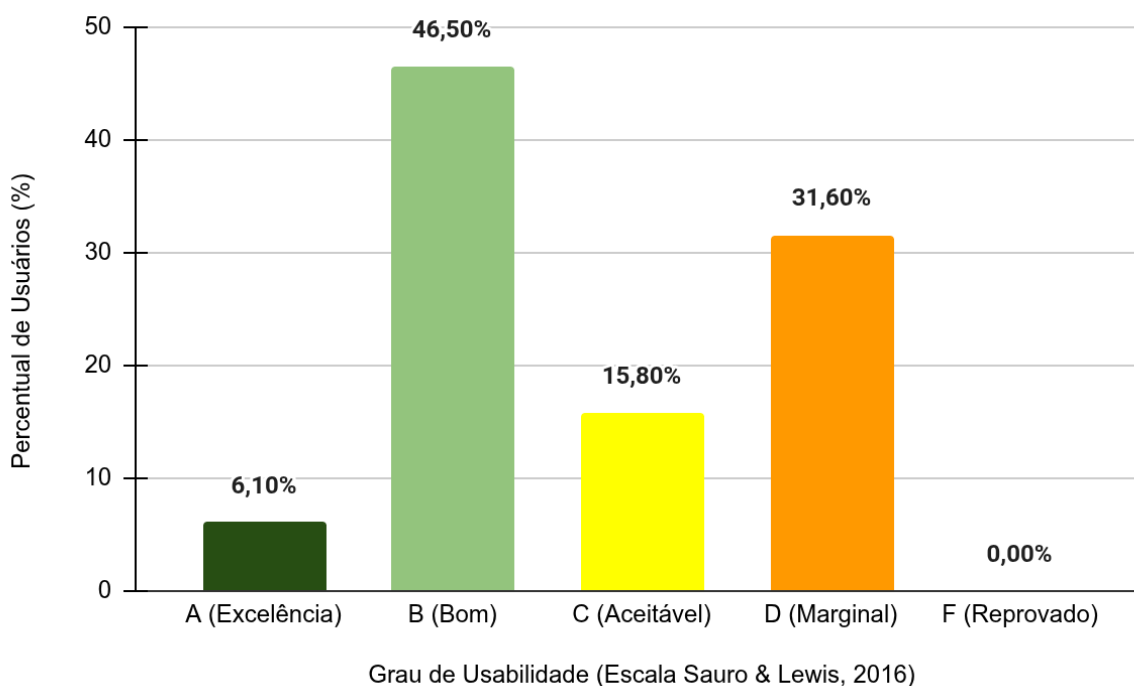
Fonte: Elaborado pelo autor com base nos relatos coletados dos gestores do COMDEMA, 2025.

A análise do Quadro 5 revela uma convergência direta entre as funcionalidades do *AraREEE* e as carências administrativas expostas nas atas ordinárias do conselho (Anexos A, B e C). Nota-se, por exemplo, que a valorização do *Dashboard* pelos conselheiros dialoga diretamente com a pauta da reunião de agosto/2025, onde se debateu a dificuldade de elaborar inventários climáticos por falta de dados primários. Da mesma forma, a aprovação do sistema de geolocalização responde às demandas de zoneamento e fiscalização territorial levantadas na reunião de abril/2025. Essa correlação comprova que o artefato não é apenas uma solução tecnológica isolada, mas uma resposta instrumental aderente às necessidades reais da governança ambiental de Arapiraca.

No que diz respeito à validação quantitativa da experiência do usuário junto aos cidadãos municipais, a aplicação do instrumento *System Usability Scale (SUS)* permitiu mensurar objetivamente a percepção de eficiência e facilidade de uso do sistema, a uma amostra de 114 respondentes. O processamento estatístico dos dados coletados junto à amostra resultou em um *Score* Médio Global de 72,89. À luz da escala de classificação proposta por Bangor *et al.* (2009), este indicador situa o artefato na Faixa B (Sucesso), conferindo-lhe a qualificação de Bom. Tal resultado demonstra que o *AraREEE* supera a linha de corte da média da indústria (68 pontos), validando a hipótese de que a *interface* é aceitável e funcional para o público-alvo.

Para compreender não apenas a média global (72,89), mas como a percepção de usabilidade varia entre os diferentes perfis de usuários, foi realizada uma análise de distribuição dos *scores* individuais. Com base na metodologia de Sauro & Lewis (2016), os *scores* foram categorizados em cinco faixas de desempenho: A (Excelência), B (Bom), C (Aceitável), D (Marginal) e F (Inaceitável/Reprovado). O Gráfico 1 ilustra a porcentagem de usuários enquadrados em cada faixa de classificação.

Gráfico 1 - Distribuição estimada dos usuários por faixa de classificação *SUS*.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

A análise dos dados revela um cenário predominantemente positivo, uma vez que 68,4% dos participantes situaram a usabilidade do *AraREEE* nas faixas de aceitação (Notas A,

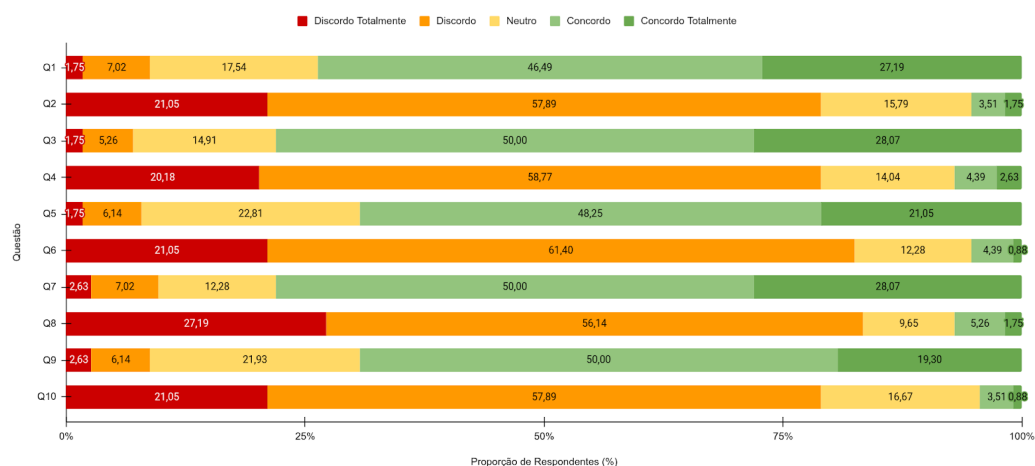
B e C). Nesse contexto, a maior concentração de usuários, correspondente a 46,5% da amostra, classificou o aplicativo na Faixa B (*scores* entre 74,0 e 80,2), indicando que, para quase metade do público, a experiência de uso foi superior à média, caracterizando-se por uma performance robusta e intuitiva que dispensa suporte técnico.

Sob outra perspectiva, observa-se um grupo significativo de 31,6% que situou a ferramenta na faixa 'Marginal' ou Faixa D (*scores* entre 51,0 e 67,9). Este dado corrobora a discussão prévia sobre letramento digital, evidenciada nas questões Q4 e Q10, sugerindo que cerca de um terço dos usuários, embora capaz de operar a ferramenta, ainda enfrenta dificuldades pontuais de navegação que impedem uma fluidez plena. Em contrapartida, uma parcela menor de 6,1% atribuiu notas de excelência (Faixa A, $> 80,3$), demonstrando que o sistema se mostra extremamente eficiente para usuários com maior familiaridade tecnológica.

Vale ressaltar que, na simulação estatística baseada nas respostas coletadas, não houve categorização na Faixa F de reprovação total ($< 51,0$), o que valida a viabilidade mínima do artefato para o público geral. Em síntese, enquanto a predominância na Faixa B reafirma a classificação geral 'Bom' do artefato, a presença da Faixa D delinea o caminho para trabalhos futuros, que deverão focar no refinamento da *interface* e na redução da carga cognitiva para converter esses usuários marginais em satisfeitos.

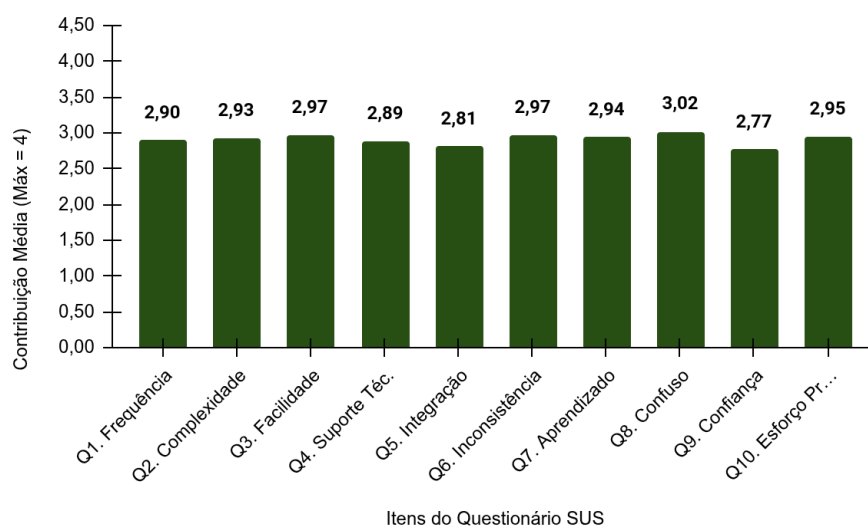
A distribuição das respostas, conforme ilustrado na Gráfico 2, demonstra uma tendência consistente de satisfação:

- **Facilidade de Uso (Q3):** A maioria expressiva dos usuários (78%) concordou ou concordou totalmente que o sistema é fácil de usar.
- **Curva de Aprendizado (Q7):** Cerca de 78% dos participantes acreditam que a maioria das pessoas aprenderia a usar o sistema muito rapidamente.
- **Barreiras Técnicas (Q4):** Apenas uma pequena minoria (7%) sentiu que precisava do suporte de uma pessoa técnica para utilizar o sistema, reforçando a autonomia proporcionada pela interface.

Gráfico 2 - Distribuição das respostas do questionário SUS.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

Ao analisar a contribuição individual de cada questão para a nota final (Gráfico 3), observa-se que os aspectos relacionados à "baixa confusão" (Q8) e "baixa inconsistência" (Q6) obtiveram as melhores pontuações relativas. Isso sugere que o *design* da aplicação foi bem-sucedido em criar um ambiente de navegação limpo e coerente.

Gráfico 3 - Contribuição média por questão para o score SUS.

Fonte: Elaborado pelo próprio autor, 2025.

6.4 DISCUSSÃO

O presente estudo identificou, a partir da análise integrada dos resultados evidencia que o *AraREEE* preenche uma lacuna tecnológica e gerencial no município de Arapiraca, a

partir da pesquisa observacional não participante realizada no COMDEMA e dos dados da RSL, que a temática dos REEE ainda não ocupa posição de destaque na agenda ambiental local, sendo frequentemente tratada de forma equivalente aos resíduos sólidos comuns. Esse cenário de invisibilidade reforça a necessidade de ferramentas que sistematizam dados e estimulem a participação social para elevar a prioridade do tema no planejamento municipal.

A validação qualitativa junto ao COMDEMA confirmou que a ausência de dados estruturados atuava como um entrave para a atuação das Câmaras Técnicas. Ao comparar as observações das reuniões, onde o tema REEE era periférico, com a recepção positiva do protótipo, nota-se que o aplicativo atua não apenas como ferramenta operacional, mas como um instrumento de inteligência de gestão. O *dashboard* gerado pelo *app* fornece, pela primeira vez, métricas que permitem ao conselho sair da inércia burocrática observada na reunião de agosto/2025 e atuar baseada em evidências.

Nesse contexto, a plataforma *AraREEE* surge como um catalisador para o fortalecimento da governança ambiental local; ao oferecer um canal de denúncias, funcionalidades de agendamento de coletas e localização de ecopontos, a solução busca sistematizar informações e incentivar a participação cidadã, fornecendo subsídios ao COMDEMA para formulação e deliberação de políticas públicas.

Diferentemente de iniciativas focadas apenas em "troca" ou "venda", o *AraREEE* inova ao focar na fiscalização e logística pública em um município de médio porte. A funcionalidade de denúncia empodera o cidadão, transformando-o em um agente ativo da política ambiental, alinhando-se às diretrizes de *Smart Cities* aplicadas a contextos de recursos limitados.

Essa abordagem está em consonância com estudos internacionais que demonstram como mecanismos de incentivo podem influenciar positivamente o comportamento do consumidor em relação à reciclagem de resíduos eletrônicos (Zhong *et al.*, 2022). Embora o Brasil seja o maior gerador de REEE na América do Sul, apresentando média per capita superior à mundial, os sistemas de gestão permanecem incipientes e, em grande parte, informais (Seabra; Caldeira-Pires, 2016). Tal cenário reforça a necessidade de campanhas educativas e da ampliação da infraestrutura de coleta, com pontos acessíveis e bem divulgados.

Entre os benefícios práticos destacados, ressaltam-se a possibilidade de consulta rápida a pontos de coleta e o agendamento simplificado de coletas, funcionalidades que facilitam o engajamento e a interação dos usuários. A natureza do artefato, fundamentada em princípios de *e-participation*, indica que a plataforma não apenas transmite informações, mas também contribui para o fortalecimento do senso de responsabilidade ambiental coletiva, promovendo participação ativa de diversos atores no gerenciamento sustentável dos resíduos eletroeletrônicos.

Em comparação com iniciativas descritas na literatura, como a de Xavier *et al.* (2021), a solução desenvolvida apresenta caráter inovador por sua contextualização em um município de médio porte brasileiro, diferenciando-se de modelos geralmente concentrados em grandes centros urbanos. Contudo, permanecem desafios relacionados à infraestrutura tecnológica, à adoção pela população e à sustentabilidade financeira da plataforma, que deverão ser considerados para garantir seu impacto contínuo e escalabilidade.

O *score SUS* de 72,89 valida o artefato como uma solução “Boa” e viável. Embora a *interface* simplificada tenha alta aceitação, a efetividade da solução dependerá de sua capacidade de ser complementada por campanhas educativas e pontos de apoio físico. A inclusão digital permanece uma barreira: parcelas da população com menor acesso à *internet* ou letramento digital podem não se beneficiar integralmente da solução. Portanto, para atingir níveis de excelência (*SUS* > 80) e garantir equidade, a tecnologia deve ser acompanhada de suporte presencial nos ecopontos e de um compromisso contínuo da gestão municipal na manutenção da infraestrutura de coleta.

A plataforma *AraREEE* demonstra a viabilidade de utilizar a tecnologia como suporte à PNRS e às políticas públicas, promovendo transparência, interação social e acesso à informação. Ao abordar diretamente a barreira da conveniência, fator crítico para a participação da população no processo de reciclagem, a solução contribui para a construção de uma cultura de responsabilidade ambiental coletiva e para o fortalecimento da governança ambiental municipal.

7 CONCLUSÃO

A pergunta de pesquisa sobre como desenvolver e implementar uma solução de *software* que promova a participação eletrônica da população de Arapiraca-AL no descarte

ambientalmente adequado de Resíduos de Equipamentos Eletroeletrônicos (REEE) foi atendida pelo desenvolvimento do protótipo *AraREEE*. A ferramenta demonstrou eficácia superior aos meios tradicionais para informar, engajar e facilitar a ação dos cidadãos, contribuindo diretamente para a gestão sustentável e transparente dos resíduos eletroeletrônicos.

Entre as principais contribuições deste trabalho, destaca-se, na esfera tecnológica, a proposição de um artefato funcional e replicável que, validado com um *score* de usabilidade (*SUS*) de 72,89, preenche importantes lacunas na literatura sobre soluções digitais para logística reversa em municípios de médio porte. Simultaneamente, o estudo oferece uma relevante contribuição metodológica ao confirmar a *Design Science Research Methodology* como uma abordagem adequada e robusta para o desenvolvimento de soluções voltadas à sustentabilidade, integrando com êxito o rigor científico à relevância prática. O estudo evidencia ainda que a tecnologia, quando alinhada às demandas locais e à participação dos *stakeholders*, possui potencial para fortalecer políticas públicas ambientais e transformar a relação entre cidadãos e a gestão de resíduos.

REFERÊNCIAS

- BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; FORTI, V.; BEL, G. **The Global E-waste Monitor 2017**. United Nations University, International Telecommunication Union & International Solid Waste Association, 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Climate-Change/Documents/GEM%202017/Global-E-waste%20Monitor%202017%20-%20Executive%20Summary.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2025.
- BALDÉ, C. P.; KUEHR, R.; YAMAMOTO, T.; MCDONALD, R.; D'ANGELO, E.; ALTHAF, S.; BEL, G.; DEUBZER, O.; FERNANDEZ-CUBILLO, E.; FORTI, V.; GRAY, V.; HERAT, S.; HONDA, S.; IATTONI, G.; KHETRIWAL, D. S.; CORTEMIGLIA, V. L.; LOBUNTSOVA, Y.; NNOROM, I.; PRALAT, N.; WAGNER, M. **The Global E-waste Monitor 2024**. International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2024.
- BANGOR, A.; KORTUM, P. T.; MILLER, J. T. **Determining what individual SUS scores mean: adding an adjective rating scale**. *Journal of Usability Studies*, [S.l.], v. 4, n. 3, p.

114-123, maio 2009. Disponível em: <https://uxpajournal.org/determining-what-individual-sus-scores-mean-adding-an-adjective-rating-scale/>. Acesso em: 30 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 9.609, de 19 de fevereiro de 1998.** Dispõe sobre a proteção da propriedade intelectual de programa de computador, sua comercialização no País, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 136, n. 36, p. 1-3, 20 fev. 1998a. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19609.htm. Acesso em: 30 ago. 2025.

BRASIL. **Lei nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998.** Altera, atualiza e consolida a legislação sobre direitos autorais e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 136, n. 36, p. 3-8, 20 fev. 1998b. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19610.htm. Acesso em: 30 ago. 2025.

BRASIL. **Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998 e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2010.

BRASIL. **Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018.** Dispõe sobre a proteção de dados pessoais e altera a Lei nº 12.965, de 23 de abril de 2014 (Marco Civil da Internet). Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 155, n. 157, p. 59-64, 15 ago. 2018. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/113709.htm. Acesso em: 30 ago. 2025.

BROOKE, J. **SUS: a "quick and dirty" usability scale.** In: JORDAN, Patrick W. *et al.* (Ed.). *Usability evaluation in industry*. London: Taylor & Francis, 1996. p. 189-194.

FIGMA. **Figma:** ferramenta de design colaborativo de interface. São Francisco: Figma Inc., [20--]. Disponível em: <https://www.figma.com/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

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) – SCYCLE

Programme, International Telecommunication Union (ITU), International Solid Waste Association (ISWA), 2020.

GOOGLE. **Firestore**: plataforma de desenvolvimento de aplicativos móveis e web. [S.l.], [20--]. Disponível em: <https://firebase.google.com/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

GOOGLE. **Google Cloud**: serviços de computação em nuvem. [S.l.], [20--]. Disponível em: <https://cloud.google.com/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

GOOGLE. **Looker Studio**: ferramenta de visualização de dados e business intelligence. [S.l.], [20--]. Disponível em: <https://lookerstudio.google.com/>. Acesso em: 30 jul. 2025.

HEVNER, A. R.; MARCH, S. T.; PARK, J.; RAM, S. **Design Science in Information Systems Research**. MIS Quarterly, v. 28, n. 1, p. 75-105, 2004.

KODULAR. **Kodular Creator**: plataforma de desenvolvimento de aplicativos para Android. [S.l.], [20--]. Disponível em: <https://www.kodular.io/>. Acesso em: 06 jul. 2025.

MEDAGLIA, R. **eParticipation research: Moving characterization forward (2006–2011)**. Government Information Quarterly, v. 29, n. 3, p. 346–360, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.giq.2012.02.010>.

MORAES, C. S. B. de; MARTIRES, G. M. B. M.; BONARETTO, C. M. V.; CAMPOS, M. O.; ANSANELLI, S. L. M.; OLIVEIRA, J. A.; MAIA, J. V. F.; BARBOSA, M. C. S. **Gestão de resíduos de equipamentos eletroeletrônicos em municípios do Estado de São Paulo: caracterização e propostas de diretrizes**. Brazilian Journal of Development, v. 7, n. 11, p. 109842–109871, nov. 2021. ISSN: 2525-8761. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv7n11-557>.

PEFFERS, K.; TUUNANEN, T.; ROTHENBERGER, M. A.; CHATTERJEE, S. **A Design Science Research Methodology for Information Systems Research**. Journal of Management Information Systems, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007. DOI: <https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302>.

PIRES, J. M. de A.; SILVA, J. L. G. da. **Logística Reversa: Uma Ferramenta Estratégica para o Desenvolvimento Sustentável**. Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional, v. 12, n. 5, 2017. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/view/2784>. Acesso em: 20 jul. 2025.

PONTES, F. N.; GIORDANO, F. **Práticas de TI Verde em uma empresa educacional para fomentar a responsabilidade socioambiental**. Revista Gestão Ambiental e Sustentabilidade – GeAS, v. 4, n. 2, 2015. DOI: 10.5585/geas.v4i2.246.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Lei n. 2.221, de 31 de dezembro de 2001**. Institui o Código Municipal de Meio Ambiente e dispõe sobre a Administração do Uso dos Recursos Ambientais e Ordenação do Uso do Solo do Território do Município de Arapiraca. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/arquivos/lei-no-2-2212001-institui-o-codigo-municipal-de-meio-ambiente-e-dispoe-sobre-administracao-do-uso-dos-recursos-ambientais-e-ordenacao-d-o-uso-do-solo-do-territorio-do-municipio-de-arapira/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Lei n. 3.040, de 23 de outubro de 2014**. Dispõe sobre o Conselho Municipal de Defesa do Meio Ambiente - COMDEMA, revoga as Leis nº 2.128/2000 e 2.493/2007, e dá outras providências correlatas. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/wp-content/uploads/2019/02/3040.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Lei n. 3.372, de 12 de novembro de 2019**. Dispõe sobre a instituição da Coleta Seletiva e Contínua de Lixo no Município de Arapiraca-Al. Disponível em: <https://transparencia.arapiraca.al.gov.br/legislacao/download/124/125>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Arapiraca incentiva a coleta seletiva com a instalação de 33 Pontos de Entrega Voluntária**. Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/2020/09/arapiraca-incentiva-coleta-seletiva-com-instalacao-de-33-pontos-de-entrega-voluntaria/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Coleta ON, Resíduo OFF: Arapiraca lança campanha de coleta de resíduos eletroeletrônicos**. Disponível em:

<https://web.arapiraca.al.gov.br/2021/11/coleta-on-residuo-off-arapiraca-lanca-campanha-de-coleta-de-residuos-eletricoeletronicos/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

PREFEITURA DE ARAPIRACA. **Arapiraca oferece quatros Ecopontos de entregas voluntárias para atendimento da população 2023.** Disponível em: <https://web.arapiraca.al.gov.br/2023/01/arapiraca-oferece-quatros-ecopontos-de-entregas-voluntarias-para-atendimento-da-populacao/>. Acesso em: 10 jun. 2025.

SAURO, J.; LEWIS, J. R. **Quantifying the user experience: practical statistics for user research.** 2. ed. Cambridge: Morgan Kaufmann, 2016.

SEABRA, D.; CALDEIRA-PIRES, A. **Gerenciamento do E-WASTE no Brasil: artigos científicos.** Educação Ambiental e Cidadania: Pesquisa e Práticas Contemporâneas, v. 2, c. 14, p. 177-187, 2016. DOI: <https://doi.org/10.37885/210303454>.

SILVA, A. R. **Gamificação e inteligência coletiva para promover a participação em sistema de bate-papo para educação.** Dissertação (Mestrado em Informática) – Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro (UNIRIO), 2016.

SILVA, M. P.; BARROS, R. P.; LIRA, T. P. S.; ALENCAR, V. E. M.; SANTOS, R. A. **Produção per capita de resíduos sólidos em diferentes residências em quatro municípios alagoanos.** Diversitas Journal, v. 6, n. 1, p. 333-340, 2021. DOI: [10.17648/diversitas-journal-v6i1-1664](https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v6i1-1664).

WANG, Z.; WANG, Q.; CHEN, B.; WANG, Y. **Evolutionary game analysis on behavioral strategies of multiple stakeholders in E-waste recycling industry.** Resources, Conservation and Recycling, v. 155, 104618, abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104618>.

XAVIER, L. H.; OTTONI, M.; LEPAWSKY, J. **Circular economy and e-waste management in the Americas: Brazilian and Canadian frameworks.** Journal of Cleaner Production, v. 297, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126570>.

ZHONG, H.; ZHOU, S.; ZHAO, Z.; ZHANG, H.; NIE, J.; SIMAYI, P. **An empirical study on the types of consumers and their preferences for E-waste recycling with a points system.** Cleaner and Responsible Consumption, v. 7, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clrc.2022.100087>.

8 CONCLUSÃO

O estudo evidenciou que a gestão de REEE em municípios de médio porte, como Arapiraca-AL, ainda enfrenta desafios significativos, como a falta de infraestrutura adequada, a baixa prioridade do tema na agenda ambiental e o engajamento limitado da população. Nesse contexto, a plataforma *AraREEE* foi concebida como uma solução tecnológica inovadora, baseada em *e-participation*, que busca transformar esse cenário ao integrar funcionalidades como agendamento de coletas, localização de ecopontos e canal de denúncias, contribuindo para a transparência e a governança ambiental. O desenvolvimento do protótipo, orientado pela metodologia *DSRM* e fundamentado em observações não participantes realizadas no COMDEMA, representa uma contribuição relevante tanto para a produção científica quanto para a prática.

No campo acadêmico, reforça-se a aplicação de metodologias voltadas à criação de artefatos que promovem a sustentabilidade e a e-governança. No âmbito prático, oferece-se um modelo replicável que pode inspirar outras cidades a aprimorar suas estratégias de logística reversa, alinhando-se às diretrizes da PNRS.

A análise realizada no estudo também evidencia que a temática dos REEE ainda carece de políticas públicas robustas e de incentivos econômicos que favoreçam a coleta e a reciclagem. A ausência dessas medidas limita a efetividade das ações de logística reversa e dificulta a consolidação de práticas sustentáveis no cotidiano da população. Nesse sentido, a plataforma *AraREEE* não apenas oferece ferramentas de gestão, mas também atua como um mecanismo de sensibilização, estimulando o engajamento social e a conscientização sobre o impacto ambiental do descarte inadequado. Além disso, o estudo revela que a aplicação de soluções tecnológicas adaptadas à realidade de municípios de médio porte exige atenção às questões de inclusão digital e capacitação dos usuários.

A *AraREEE*, ao considerar essas dimensões, contribui para reduzir barreiras de acesso e fortalecer a participação cidadã, destacando-se como um modelo que pode ser expandido ou ajustado para diferentes contextos municipais. Outro aspecto relevante é a possibilidade de gerar dados quantitativos e qualitativos que apoiem o planejamento estratégico da gestão ambiental local. Ao sistematizar informações sobre pontos de coleta, frequência de uso e tipos de resíduos descartados, a plataforma oferece subsídios para a tomada de decisão, aprimorando a eficiência das políticas públicas e fortalecendo a governança ambiental municipal, demonstrando que a integração entre tecnologia, gestão e participação social pode

gerar impactos positivos concretos, não apenas na coleta de REEE, mas também na formação de uma cultura de responsabilidade ambiental. A replicabilidade do artefato em outros municípios reforça a relevância de iniciativas que alinhem inovação tecnológica a estratégias de sustentabilidade, contribuindo para a construção de cidades mais conscientes e ambientalmente responsáveis.

8.1 PRODUÇÃO DE PRODUTO TÉCNICO / TECNOLÓGICO

A dissertação apresenta como produto técnico-tecnológico uma plataforma de *software* para a gestão de REEE. Esta solução foi desenvolvida para operacionalizar o conhecimento técnico-científico, fornecendo uma ferramenta dinâmica e interativa aos usuários da solução. A arquitetura do sistema foi concebida com base em uma rigorosa triangulação de dados, envolvendo uma revisão bibliográfica, pesquisa observacional no COMDEMA e legislação ambiental, assegurando que suas funcionalidades fossem fundamentadas em evidências e normativas legais.

A plataforma de gestão, direcionada a cidadãos e gestores municipais, atua como um instrumento para a minimização dos impactos socioambientais causados pelo descarte de REEE. Ao fornecer, de forma interativa, critérios e melhores práticas para a logística reversa, o sistema permite uma gestão mais eficiente e transparente. Além de otimizar os processos de coleta e tratamento, espera-se que a solução contribua socialmente ao beneficiar diretamente os trabalhadores envolvidos, assegurando que sigam procedimentos corretos e seguros, transformando o desafio dos REEE em uma oportunidade para aprimorar a gestão e promover a economia circular.

Como etapa final de validação e proteção do ativo intelectual desenvolvido, o *software AraREEE* será submetido a registro junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), na modalidade de Programa de Computador, em conformidade com a Lei nº 9.609/1998 (Lei do *Software*) e a Lei nº 9.610/1998 (Lei de Direitos Autorais). O processo de registro se dará através da plataforma *e-Software* do INPI, seguindo um fluxo que garante a segurança jurídica e a integridade do código-fonte. O procedimento adotado consistirá na transformação do código-fonte e das telas do sistema em um resumo digital *hash*, que atua como uma impressão digital única e inviolável do arquivo original. Este resumo, juntamente

com a Declaração de Veracidade (DV), será protocolado eletronicamente, garantindo a proteção dos direitos autorais e patrimoniais da solução.

A efetivação deste registro é fundamental para viabilizar a futura transferência de tecnologia para a Prefeitura de Arapiraca ou outros entes públicos, assegurando que a cessão de uso ou a disponibilização do sistema como *software* livre ocorra com a devida autoria preservada e documentada.

8.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Não obstante a validação positiva da usabilidade do artefato, é importante reconhecer que a escolha por uma solução baseada exclusivamente em tecnologia móvel impõe, por natureza, barreiras de acesso relacionadas à exclusão digital. A efetividade do *AraREEE* pressupõe que o cidadão possua não apenas letramento digital mínimo, mas também a propriedade de um *smartphone* compatível e acesso a planos de dados móveis. Essa exigência técnica pode, inadvertidamente, marginalizar as camadas mais vulneráveis da população de Arapiraca, grupos estes que frequentemente residem em áreas com maior incidência de descarte irregular e que poderiam não se beneficiar integralmente da ferramenta sem o suporte de políticas de inclusão ou pontos de apoio físico.

Intrinsecamente ligada a este fator socioeconômico, reside a limitação técnica referente à dependência da infraestrutura de conectividade. O protótipo atual opera condicionado à existência de uma conexão ativa com a *internet* para a sincronização de dados em tempo real junto ao servidor (*Firebase*). A ausência de uma funcionalidade *offline* robusta no estágio atual de desenvolvimento restringe a eficácia do sistema em zonas rurais ou regiões periféricas do município onde a cobertura de sinal de telefonia é oscilante ou inexistente, o que pode comprometer a tempestividade das denúncias e agendamentos nessas localidades.

Por fim, deve-se considerar a limitação sistêmica de que o aplicativo atua como uma ferramenta de meio, e não de fim. O sucesso da solução tecnológica está indissociavelmente atrelado à capacidade operacional da Prefeitura e das cooperativas parceiras em responder às demandas geradas. Contudo, essa dependência operacional não limita o potencial de escalabilidade do artefato. Devido à sua arquitetura modular, o *AraREEE* pode ser replicado e adaptado para outros órgãos da administração pública ou consórcios intermunicipais, permitindo a gestão de diferentes fluxos de resíduos sólidos. A escalonabilidade da solução

reside na possibilidade de integração com outros sistemas de gestão urbana e na sua portabilidade para realidades municipais distintas, transformando-se em uma plataforma de governança ambiental compartilhada que pode ser adotada por secretarias de infraestrutura ou órgãos de vigilância sanitária em nível regional.

Como o *software* não executa a logística física, existe o risco de que eventuais falhas no recolhimento dos resíduos agendados gerem uma quebra de expectativa no cidadão, desacreditando a ferramenta digital. Portanto, a eficácia do *AraREEE* não reside apenas em seu código, mas na integração efetiva com a infraestrutura de serviços urbanos, cujas falhas ou limitações operacionais fogem ao controle direto do desenvolvimento tecnológico proposto neste estudo.

8.3 TRABALHOS FUTUROS

A continuidade desta pesquisa demanda um olhar que transcenda a necessária evolução técnica do código, voltando-se estrategicamente para a perenidade institucional da solução. Em uma primeira esfera, recomenda-se a implementação das melhorias funcionais identificadas na etapa de validação, especificamente o desenvolvimento de um modo *offline* robusto e a introdução de dinâmicas de gamificação, visando ampliar a adesão popular e mitigar as barreiras de exclusão digital e conectividade previamente diagnosticadas.

Contudo, para que o *AraREEE* se consolide efetivamente como uma política pública, é fundamental o estabelecimento de um modelo de governança claro, onde a titularidade e a gestão da plataforma sejam formalmente transferidas para a estrutura administrativa municipal, preferencialmente sob a tutela do COMDEMA ou da Secretaria de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Essa institucionalização deve ser acompanhada da estruturação de um modelo de sustentabilidade financeira que garanta a manutenção do sistema a longo prazo, independente de oscilações orçamentárias da administração pública.

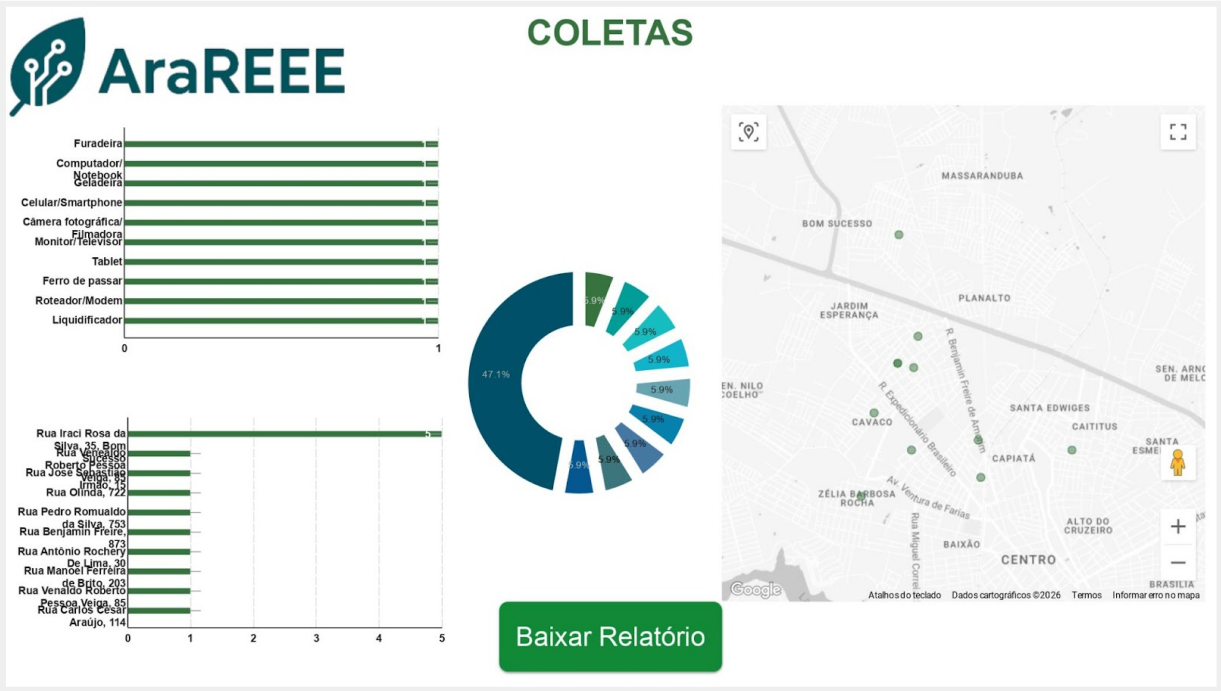
Nesse sentido, vislumbra-se como linha de investigação futura a modelagem de Parcerias Público-Privadas (PPPs) ou acordos de cooperação técnica com as Entidades Gestoras de Logística Reversa. Considerando as exigências do Decreto Federal nº 10.240/2020, a plataforma possui potencial para evoluir de um canal de denúncias para uma ferramenta de certificação de créditos de reciclagem. Desta forma, o projeto deixaria de representar um custo operacional para o município e passaria a atuar como um ativo

autossustentável de inteligência ambiental. Por fim, sugere-se a realização de estudos de viabilidade para a expansão geográfica da solução através de consórcios intermunicipais, permitindo escalonar a logística reversa para toda a região metropolitana do Agreste Alagoano.

Como outro desdobramento desta pesquisa, propõe-se a realização de um estudo longitudinal para mensurar quantitativamente o aumento na coleta de REEE a partir dos agendamentos realizados via aplicativo. Adicionalmente, recomenda-se uma avaliação de impacto ambiental que compare os cenários anterior e posterior à implantação da solução no município, utilizando como base os indicadores oficiais de coleta fornecidos pela Prefeitura de Arapiraca e pelo COMDEMA, a fim de validar a eficácia do artefato na mitigação do descarte irregular.

APÊNDICE A – TELA PRINCIPAL

APÊNDICE B – TELA DE COLETA



APÊNDICE C – TELA DE DENÚNCIA

