

ECOTAG: DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE ETIQUETAGEM COM QR CODE PARA A SEPARAÇÃO DE RESÍDUOS DOMÉSTICOS

Guilherme da Silveira Coelho¹, Cristiane Machado de Vargas², Matheus Leandro Ferreira³

Resumo: A gestão de resíduos urbanos segue como um desafio central para a saúde coletiva e o equilíbrio ambiental. A triagem inadequada nos pontos de descarte reduz a eficiência da reciclagem, envia materiais reproveitáveis aos aterros e desperdiça recursos. Em países da Ásia e da África, concentra-se cerca de 70% do potencial de vazamento de resíduos municipais, reforçando a urgência de sistemas mais eficientes e circulares. O trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de etiquetagem para resíduos domésticos utilizando *QR Codes* e conceitos de Internet das Coisas. O sistema é composto por um módulo leitor baseado em ESP32-CAM e Arduino Uno, responsável por interpretar os códigos e acionar um servo motor para destinar os resíduos ao compartimento correto, e por um módulo web que permite ao usuário gerar *QR Codes* de acordo com o tipo de resíduo. Os testes realizados demonstraram 100% de acerto na leitura dos códigos e no descarte em tempo médio inferior a 1 s, comprovando a viabilidade técnica e o baixo custo da solução. A proposta busca estimular a educação ambiental e a prática da economia circular, reduzindo o descarte inadequado em aterros.

Palavras-chave: gestão de resíduos; qr code; IoT; reciclagem; sustentabilidade.

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), gui.silveiracoelho@gmail.com

²Coorientadora. Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, profcrismv@gmail.com

³Orientador. Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), mlf@unesc.net

ABSTRACT: Urban waste management remains a central challenge for public health and environmental balance. Inadequate sorting at disposal points reduces recycling efficiency, diverts recoverable materials to landfills, and wastes resources. In countries across Asia and Africa, roughly 70% of the potential leakage of municipal solid waste is concentrated, underscoring the urgency for more efficient and circular systems. This work proposes the development of a labeling system for household waste using *QR codes* and Internet of Things concepts. The system comprises a reader module based on an ESP32-CAM and an Arduino Uno, responsible for interpreting the codes and actuating a servo motor to route waste to the correct compartment, and a web module that allows users to generate *QR codes* according to the waste type. Tests achieved 100% reading accuracy and a mean sorting time of under 1 s, demonstrating the solution's technical feasibility and low cost. The proposal aims to foster environmental education and circular economy practices, reducing improper landfill disposal.

Keywords: waste management; qr code; IoT; recycling; sustainability.

1 INTRODUÇÃO

A gestão eficiente de resíduos urbanos é um dos maiores desafios enfrentados pelas sociedades contemporâneas, com implicações diretas para a saúde pública e a preservação ambiental. A separação inadequada de resíduos recicláveis e não recicláveis nos pontos de descarte compromete significativamente a eficiência da reciclagem. Isso resulta no envio indevido de materiais recicláveis para aterros sanitários, aumentando a poluição e resultando no desperdício de recursos que poderiam ser reutilizados. Em regiões como a Ásia e a África, cerca de 70% do potencial de vazamento de resíduos sólidos municipais ocorre, sublinhando a urgência de implementar sistemas de gestão de resíduos mais eficientes e circulares (Gómez-Sanabria; Lindl, 2024).

A quantidade de lixo urbano produzido, bem como sua coleta, tem relação com a saúde da população e com a proteção ao meio ambiente. Quando os resíduos não coletados são postos em locais inapropriados, especialmente a céu aberto, por exemplo, eles proporcionam um ambiente propício à geração de vetores causadores de várias doenças contagiosas (Almeida; Silveira; Engel, 2020).

Aproximadamente 160 mil toneladas de lixo são produzidas no Brasil diariamente. Cerca de 30% a 40% deste total poderia ser reciclado.

Porém, apenas 13% de todo o lixo produzido é, de fato, reciclado (Silva, 2017).

Nesse contexto, a tecnologia surge como uma aliada, possibilitando novas estratégias, assim como a melhor administração dos resíduos sólidos e um gerenciamento mais favorável deles. Estudos como o do aplicativo “Descarte Aqui” de MAV e LORASQUI (2017), “*Recycler*” de Ferreira e Sambinelli (2017) e “*Vision Ambiental*” de Lara et al. (“2020”), apresentam o uso do smartphone como uma ferramenta para o auxílio das denúncias relacionadas ao meio ambiente.

Nesse sentido, a inovação tecnológica pode ser uma alternativa prática e eficaz no monitoramento do descarte dos resíduos, facilitando e incentivando, por meio de interfaces simples e intuitivas, a coleta e separação correta de resíduos. Além disso, ao possibilitar uma maior educação sobre os conceitos de reciclagem e descarte correto, será possível reduzir consideravelmente o impacto ambiental causado pelo acúmulo inadequado de lixo. Com o auxílio de aplicativos móveis e outras ferramentas digitais, as pessoas podem ser guiadas de forma prática sobre como separar e descartar seus resíduos corretamente, aumentando a taxa de reciclagem e diminuindo a poluição. Isso não só contribui para a preservação do meio ambiente, mas também pode levar a uma gestão mais eficiente dos recursos naturais, incentivando a economia circular e diminuindo a pressão sobre os aterros sanitários.

Portanto, o intuito deste projeto é, por meio da criação de uma lixeira inteligente utilizando *QR Codes*, proporcionar uma solução prática e eficaz para a separação correta de resíduos. Com o uso dessa tecnologia, espera-se facilitar a identificação e separação automatizada dos diferentes tipos de resíduos por meio de uma interface simples e intuitiva. Com um protótipo funcional, a proposta é demonstrar que a tecnologia pode simplificar o processo de descarte, incentivando a adoção por parte dos usuários e, conseqüentemente, minimizando os danos ambientais causados pela destinação inadequada de resíduos.

Este trabalho tem como objetivo geral melhorar a eficiência da separação de resíduos em ambientes residenciais por meio da implementação de um sistema inteligente utilizando *QR Codes*.

Além disso, os objetivos específicos definidos foram: identificar os tipos de resíduos domésticos que serão classificados pelo sistema de *QR Codes*, implementar um protótipo de lixeira inteligente que utilize *QR Codes* para a separação automatizada desses resíduos, avaliar a eficiência

do sistema em comparação com métodos tradicionais de separação e, por fim, testar a solução simulando o descarte, verificando a precisão e rapidez da solução.

A presente pesquisa justifica-se pela relevância social, ambiental e econômica de enfrentar a crescente crise socioambiental e, em especial, o aumento dos resíduos sólidos urbanos nas cidades (Ferreira, 2022; Molinari, 2015). A literatura e as políticas educacionais apontam que a escola é um espaço estratégico para formar hábitos sustentáveis (sobretudo entre crianças, que atuam como multiplicadoras desses comportamentos no âmbito familiar) mas a gestão doméstica de resíduos ainda carece de soluções acessíveis, intuitivas e de baixo custo (Oliveira; Machado; Oliveira, 2015; Araldi et al., 2021).

Nesse contexto, propõe-se um sistema simples e economicamente viável, baseado em *QR Codes*, para apoiar a separação e o descarte corretos no ambiente residencial. A tecnologia, de fácil implementação e uso, moderniza práticas cotidianas sem exigir altos investimentos, reforçando a educação ambiental, reduzindo impactos e favorecendo o uso racional de recursos (Ribas et al., 2017; Duque; Carbo; Pereira, 2017).

Este trabalho está organizado em cinco seções, sendo a primeira seção a introdução ao tema, o objetivo geral, os objetivos específicos e a justificativa da pesquisa. A segunda seção traz trabalhos correlatos realizados na mesma área de pesquisa deste trabalho, com foco em analisar as principais tecnologias envolvidas, seus benefícios ambientais e desafios de implementação. Na terceira seção, são descritos os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do protótipo, dividindo-o em dois módulos: leitor e web. A quarta seção analisa o desempenho da solução com base em testes realizados. Na quinta e última seção, são apresentadas as conclusões do trabalho, contribuições e sugestões de pesquisas futuras.

2 TRABALHOS CORRELATOS

Para entender o cenário atual das tecnologias aplicadas ao gerenciamento de resíduos e identificar possíveis lacunas, foram estudados projetos que utilizam Arduino e sensores. Na sequência, são abordados os trabalhos mais relevantes, destacando-se pela inovação tecnológica e pelas contribuições alinhadas ao tema deste estudo.

2.1 INTELLIGENT WAST MANAGEMENT SYSTEM USING DEEP LEARNING WITH IOT

O artigo escrito por Wahidur Rahman no ano de 2022, publicado pela Revista da Universidade King Saud, Ciências da Computação e da Informação, apresenta uma arquitetura voltada para o desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de resíduos baseado em aprendizado profundo e Internet das Coisas (IoT). O modelo proposto oferece uma abordagem inteligente para classificação de resíduos digestíveis e não digestíveis, utilizando uma Rede Neural Convolucional (CNN), um paradigma popular de aprendizado profundo (Rahman et al., 2022).

Entre as principais limitações do estudo, destaca-se o fato de o modelo operar com apenas cinco categorias de resíduos não digestíveis, o que reduz sua aplicabilidade em cenários mais complexos. Além disso, o protótipo desenvolvido utiliza apenas dois sensores, restringindo a precisão da coleta de dados. Outra limitação observada é a dificuldade do sistema em identificar corretamente o estado de enchimento da lixeira, que pode aparentar estar cheia mesmo quando ainda há espaço disponível (Rahman et al., 2022).

De modo geral, o artigo representa uma proposta relevante de sistema de monitoramento de resíduos em tempo real, que combina o potencial do aprendizado profundo com a IoT. A pesquisa é conduzida com uma sequência estruturada de etapas de desenvolvimento, visando assegurar um processo mais eficiente e automatizado de gerenciamento de resíduos (Rahman et al., 2022).

2.2 APLICAÇÃO DOS CONCEITOS E FERRAMENTAS DE IOT À GESTÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA EXPLORAÇÃO INICIAL

A pesquisa feita por Marco Aurélio Castro e Jacqueline Lafratta no ano de 2020 publicada pela revista Engenharia Urbana em Debate identifica que a *IoT* pode ser utilizada para monitorar parâmetros como temperatura, umidade e aeração durante o processo de compostagem, além de otimizar rotas de coleta e reduzir o desperdício de alimentos por meio de lixeiras inteligentes (Castro; Lafratta, 2020).

A metodologia do trabalho incluiu uma revisão bibliográfica inicial, seguida de uma análise de tendências de busca no Google *Trends* para os termos "*IoT*" e "*Smart Cities*", mostrando um crescimento significativo de interesse a partir de 2013. Além disso, os autores realizaram

uma pesquisa em bases de dados científicas como *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*, utilizando palavras-chave como "*IoT*", "*composting*", "*waste management*" e "*organic waste*". Foram selecionados artigos que abordavam aplicações de IoT na gestão de resíduos orgânicos, com foco em sistemas de monitoramento remoto, lixeiras inteligentes e otimização de processos de compostagem (Castro; Lafratta, 2020).

Os resultados do estudo apontam que a *IoT* pode trazer benefícios significativos para a gestão de resíduos orgânicos, como a geração de dados em tempo real para melhor controle do processo de compostagem, a redução da exposição dos operadores a agentes patogênicos e a otimização das rotas de coleta.

2.3 USO DE *IOT* PARA AUXILIAR NA COLETA DE LIXO URBANO

O artigo escrito por Igor Lima no ano de 2022 e publicado nos anais estendidos do XVIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação utiliza a Internet das Coisas (*IoT*) para aprimorar a coleta de resíduos sólidos urbanos (RSU) por meio do desenvolvimento do Sistema de Coleta de Lixo Inteligente (SiCOL). Os autores destacam a importância da gestão eficiente dos RSU como parte das estratégias para o desenvolvimento sustentável, especialmente em cidades inteligentes, onde a tecnologia pode otimizar processos e melhorar a qualidade de vida dos cidadãos. O SiCOL foi desenvolvido em parceria entre o Instituto Federal de Pernambuco (IFPE) e a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), com o objetivo de melhorar a coleta de lixo nos campi dessas instituições, utilizando sensores e dispositivos *IoT* para monitorar e gerenciar a coleta de resíduos (Lima et al., 2022).

A metodologia adotada no desenvolvimento do SiCOL envolveu a divulgação do aplicativo nas localidades de implementação, seguida de um estudo de caso para entender as necessidades da comunidade e adaptar o sistema às demandas locais. Os pesquisadores utilizaram a metodologia *Kanban* para gerenciar o desenvolvimento do aplicativo móvel, que foi criado com a tecnologia Flutter, permitindo sua disponibilização em plataformas Android e iOS. Além disso, o sistema foi integrado a um protótipo de hardware que utiliza sensores para coletar dados como localização, nível de CO₂, temperatura e umidade, que são armazenados em um banco de dados PostgreSQL e sincronizados em tempo real com os dispositivos conectados (Lima et al., 2022).

Os resultados do projeto demonstraram que o SiCOL é capaz

de otimizar a coleta de resíduos, notificando os usuários sobre o horário e a localização da coleta, além de permitir que os cidadãos informem a presença de lixo nas ruas. O sistema foi implementado em oito ruas do campus da UFPE, com a participação de três caminhões de coleta e seis catadores, realizando coletas duas vezes ao dia. A análise de usabilidade do aplicativo mostrou que ele é eficiente em fornecer informações sobre a coleta de lixo, permitindo que os usuários acompanhem o trajeto dos veículos e o horário de passagem, o que contribui para uma gestão mais eficiente dos RSU (Lima et al., 2022).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protótipo funcional de uma lixeira inteligente, projetada para automatizar o processo de separação de resíduos sólidos domésticos por meio da utilização de códigos QR (*Quick Response*). Para isso, foram utilizados conceitos de Internet das Coisas (IoT). O projeto foi dividido em dois módulos principais: leitor e aplicativo web. O sistema foi arquitetado para fornecer um *QR Code* válido, por meio do aplicativo web, e utilizá-lo para leitura e definição do recipiente de descarte ideal. A Figura 1 apresenta a visão geral da arquitetura desenvolvida.

Figura 1 - Arquitetura geral do sistema ECOTAG



Fonte: Do autor.

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à interconexão de dispositivos físicos capazes de coletar, processar e transmitir dados por meio de

redes de comunicação, sem a necessidade de intervenção humana contínua. No contexto deste projeto, a IoT foi aplicada para integrar componentes de hardware e software, permitindo a comunicação entre o módulo web e o módulo leitor físico. Essa integração possibilita que o *QR Code* gerado digitalmente seja interpretado pelo sistema embarcado, que, por sua vez, aciona mecanismos físicos de forma automática e precisa.

Além disso, o uso da IoT neste sistema reforça características essenciais como autonomia, monitoramento remoto e baixo consumo energético, típicas de soluções inteligentes. A arquitetura modular proposta favorece a escalabilidade, permitindo futuras expansões, como a inclusão de sensores adicionais para medir o nível de enchimento das lixeiras ou integrar a solução com plataformas de coleta inteligente em nuvem.

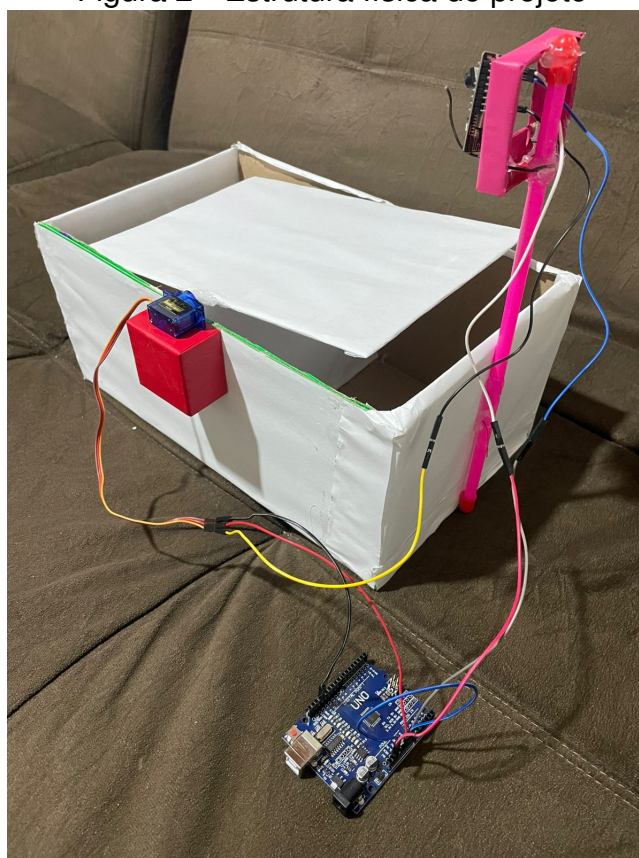
3.1 MÓDULO LEITOR

O módulo leitor é responsável pela captura e interpretação dos *QR Codes* que identificam o tipo de resíduo descartado, acionando automaticamente o mecanismo de separação física. Ele é composto por uma placa Arduino Uno, utilizada como fonte de alimentação e interface de controle, e um módulo ESP32-CAM, encarregado de realizar a leitura do código e enviar o comando de rotação ao servo motor, que direciona a base da lixeira para o compartimento correspondente.

Para integrar esses elementos de forma simples, organizou-se o fluxo em três etapas: ler o *QR Code*, interpretar o tipo de resíduo e acionar o giro da base. O ESP32-CAM realiza a leitura e envia o comando; o Arduino Uno estabiliza a alimentação e coordena o acionamento do servo. Foram definidos ajustes básicos (como ângulo e tempo de rotação) para adequar o movimento ao posicionamento da lixeira. Esse arranjo mantém o custo baixo, facilita a troca de peças e garante que o protótipo funcione de maneira clara e repetível.

A estrutura física do protótipo foi confeccionada manualmente em papelão, com reforços e apoios fixados por cola quente, conforme apresentado na Figura 2. Essa abordagem buscou demonstrar a viabilidade funcional do sistema com baixo custo de implementação, priorizando a simplicidade e a reprodutibilidade do modelo.

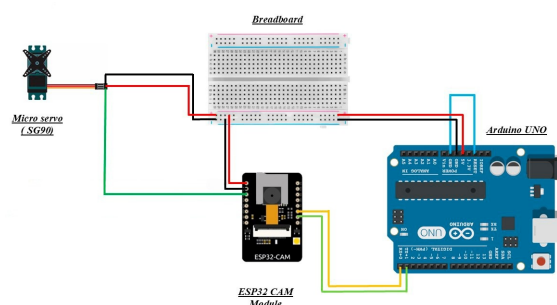
Figura 2 - Estrutura física do projeto



Fonte: Do autor.

O circuito elétrico do projeto é apresentado na Figura 3, onde se observa a integração entre o ESP32-CAM, o Arduino Uno e o servo motor. O ESP32-CAM foi adotado por incorporar nativamente uma câmera e oferecer suporte a bibliotecas de visão computacional, o que possibilita a leitura e decodificação de QR Codes sem a necessidade de módulos adicionais.

Figura 3 - Circuito Elétrico do projeto



Fonte: Do autor.

Durante o desenvolvimento e os testes do protótipo, constatou-

se que a estabilidade da imagem e o baixo movimento do ESP32-CAM são fatores determinantes para a qualidade da captura. Devido à baixa taxa de quadros por segundo, pequenas vibrações podem comprometer a leitura do QR Code. Para mitigar esse problema, o dispositivo foi fixado em uma base branca, aumentando o contraste e a nitidez da imagem, o que resultou em uma interpretação mais precisa dos códigos.

O Arduino Uno foi mantido na arquitetura para fornecer uma alimentação elétrica estável tanto ao ESP32-CAM quanto ao servo motor, garantindo a execução sincronizada das tarefas e o funcionamento contínuo do sistema.

3.2 MÓDULO WEB

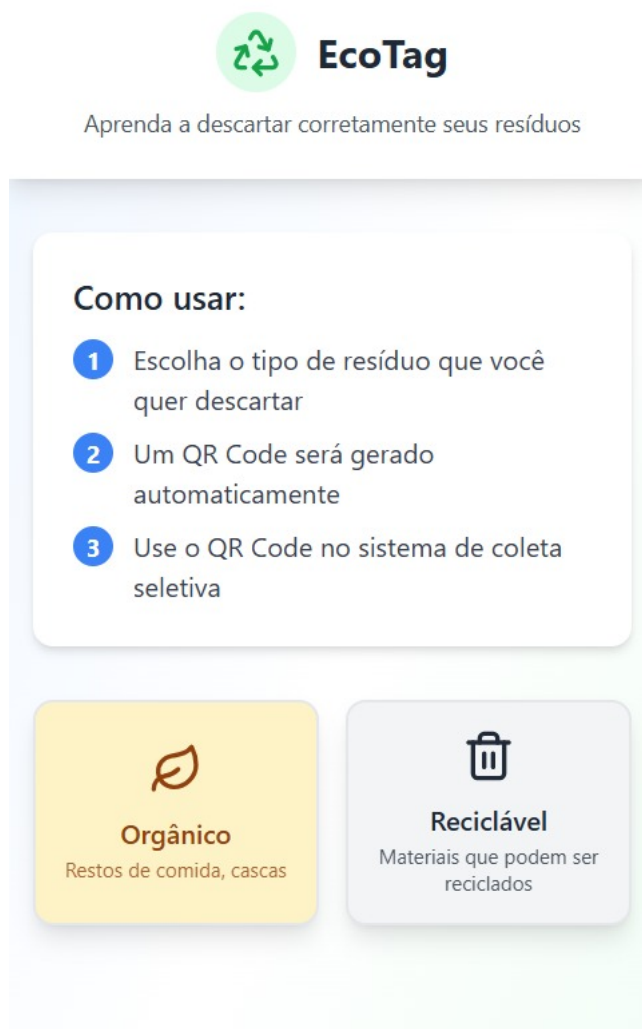
O módulo web foi desenvolvido com o objetivo de oferecer uma interface simples e intuitiva para a geração e gestão dos *QR Codes* utilizados no processo de descarte. Essa camada representa a interface de interação entre o usuário e o sistema físico, sendo responsável por codificar digitalmente o tipo de resíduo em um *QR Code* que será posteriormente interpretado pelo módulo leitor.

O aplicativo foi implementado em *TypeScript*, utilizando o *framework Vite*, conhecido por sua leveza, rapidez na compilação e suporte ao desenvolvimento modular. A escolha dessas tecnologias visou agilidade no desenvolvimento, manutenção facilitada e compatibilidade com navegadores modernos, além de permitir uma futura integração com APIs REST, caso o sistema venha a evoluir para um ambiente distribuído.

Como fluxo de uso, o usuário escolhe a categoria do resíduo e o sistema gera imediatamente um *QR Code* correspondente, pronto para impressão ou download em formato de imagem. Cada código carrega um identificador simples da categoria, permitindo que o módulo leitor reconheça o tipo de resíduo sem depender de conexão com a Internet. Essa abordagem direta reduz etapas, facilita a adoção em casa e mantém a compatibilidade com uma possível evolução para registro e histórico de códigos no futuro.

A interface do sistema, como pode ser visualizado na Figura 4, apresenta uma lista de categorias de resíduos, cada uma representada por um botão contendo ícone e título (estratégia de design que facilita a identificação visual e reduz erros de seleção).

Figura 4 - Tela inicial do sistema *WEB*



Fonte: Do autor.

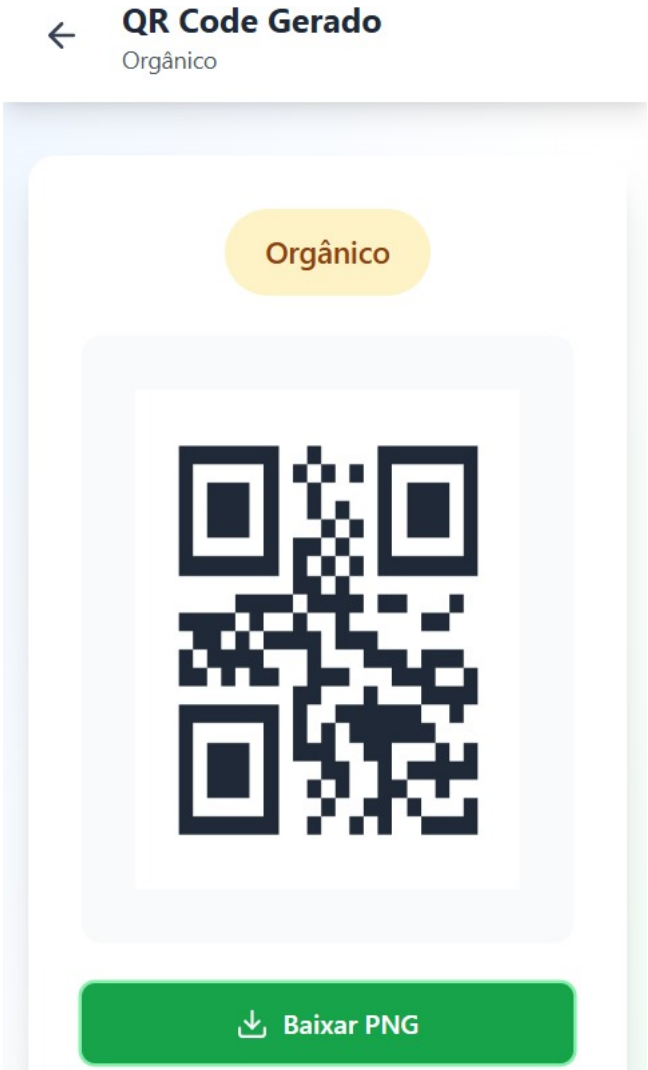
Após a escolha do tipo de resíduo, o sistema gera automaticamente o QR Code correspondente, oferecendo ainda a opção de download no formato PNG para impressão e fixação nas embalagens de descarte. Esse processo ocorre de forma totalmente automatizada, a partir dos dados previamente cadastrados no módulo web, garantindo que cada tipo de resíduo receba um identificador único e rastreável. O algoritmo de geração considera parâmetros como o código interno do resíduo, o local de origem e o destino previsto, assegurando a integridade das informações e evitando duplicidades.

Além disso, o QR Code é criado em alta resolução, o que facilita sua leitura por diferentes dispositivos, desde smartphones até leitores industriais. Dessa forma, o sistema proporciona maior praticidade ao processo de descarte e rastreabilidade ambiental, reforçando a integração

entre o módulo web e o sistema físico de coleta inteligente.

A Figura 5 ilustra o momento em que o código é gerado e disponibilizado para download, evidenciando a integração entre o módulo web e o sistema físico de coleta inteligente.

Figura 5 - Sistema *WEB* mostrando *QR Code* selecionado



Fonte: Do autor.

Durante os testes, o módulo web apresentou alta responsividade e baixo tempo de geração dos *QR Codes*, contribuindo para uma experiência de uso fluida. Além disso, por operar de forma independente do módulo leitor, o sistema mantém modularidade e escalabilidade, possibilitando futuras atualizações em cada camada sem comprometer o funcionamento geral.

Em síntese, o módulo web atua como o componente de entrada e configuração do sistema, convertendo a intenção do usuário em dados

codificados que, posteriormente, orientam o funcionamento automatizado da lixeira. Essa separação clara entre interface de software e comando físico reforça a aderência da solução aos princípios de arquitetura modular e Internet das Coisas (IoT), garantindo flexibilidade e evolução tecnológica do projeto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido, foram conduzidos ensaios experimentais controlados com foco em três dimensões principais:

1. Precisão da leitura dos *QR Codes*;
2. Tempo médio de resposta do sistema; e
3. Estabilidade operacional em diferentes condições de iluminação e posicionamento.

Os testes foram realizados em ambiente interno, com o protótipo montado sobre uma base fixa. Foram utilizados dois tipos de resíduos (Reciclável e Orgânico), cada um identificado por um *QR Code* único gerado no módulo web.

Para cada categoria, foram realizadas 20 tentativas de leitura, totalizando 40 operações completas (leitura → interpretação → acionamento do servo motor). As condições de iluminação foram alternadas entre baixa (200 lx), média (500 lx) e alta (800 lx) intensidade, simulando variações ambientais típicas de residências.

A Tabela 1 apresenta o resumo dos resultados observados durante os testes.

Tabela 1 - Resultados das leituras				
Desempenho de Leitura por Categoria				
Categoria	Leituras	Corretas	Taxa de acerto (%)	Tempo médio (s)
Reciclável	20	20	100	0,95
Orgânico	20	20	100	0,93

Fonte: Do autor.

Os resultados demonstram uma taxa de acerto de 100% na leitura dos *QR Codes* em todas as categorias, evidenciando a confiabilidade

do módulo leitor e a robustez da integração com o servo motor. O tempo médio total de resposta foi de 0,91 s, medido entre a detecção do código e o acionamento completo da base. Esse valor indica uma reação praticamente imediata, compatível com aplicações domésticas em tempo quase real.

Apesar dos resultados satisfatórios obtidos nos testes controlados, vale destacar uma limitação observada durante testes preliminares e manipulações manuais do sistema: *QR Codes* amassados, rasurados ou com danos físicos significativos não são reconhecidos de forma confiável pelo módulo de leitura. Essa limitação se deve à dependência da integridade visual do código para que a decodificação ocorra corretamente, o que pode comprometer a operação em ambientes onde o material esteja sujeito a desgaste, sujeira ou manipulação inadequada.

Durante os testes com iluminação reduzida (200 lx), observou-se um aumento pontual no tempo de leitura (média de 1,12 s), causado pela menor nitidez da imagem capturada. Entretanto, o índice de reconhecimento permaneceu em 100%, demonstrando que o contraste da base branca foi eficaz para compensar limitações ópticas do módulo ESP32-CAM.

Ao comparar os resultados com os trabalhos de Rahman et al. (2022), observa-se que, embora o sistema proposto por esses autores tenha apresentado um desempenho satisfatório na classificação por *deep learning*, ele exige uma maior complexidade computacional e um número superior de sensores. Já o sistema ECOTAG atinge desempenho semelhante em precisão de reconhecimento, com custo e complexidade substancialmente menores.

Em relação ao estudo de Castro e Lafratta (2020), que aborda a aplicação de IoT na compostagem orgânica, o presente sistema atua em uma etapa anterior, a identificação e triagem na origem, complementando as soluções voltadas à compostagem e aumentando a eficiência da coleta seletiva.

Por fim, ao contrastar com o SiCOL de Lima et al. (2022), nota-se que, enquanto aquele trabalho foca na logística de coleta urbana, o ECOTAG contribui para melhorar a qualidade do material coletado, promovendo a padronização de informações e a integrabilidade com soluções de coleta inteligente.

Os resultados obtidos confirmam a viabilidade técnica e funcional do sistema proposto. O desempenho consistente nas leituras, aliado à

baixa latência de resposta, evidencia que a solução pode ser aplicada em escala doméstica sem necessidade de calibração complexa.

Além disso, a modularidade entre as camadas web e física permite evolução futura, como o aumento do número de compartimentos ou integração com aplicativos móveis de monitoramento. Tais características reforçam o potencial do ECOTAG como uma solução de baixo custo, escalável e educativa, com impacto direto na melhoria da triagem e uma redução do descarte inadequado de resíduos domésticos.

O projeto foi submetido a vários testes, tendo foco na avaliação da precisão e velocidade da leitura e descarte. Os resultados dos testes apresentaram um acerto de 100% na leitura do *QR Code* e escolha do compartimento para descarte do resíduo. O tempo de duração entre o posicionamento do *QR Code* e a movimentação da base ficou, em média, abaixo de um segundo.

Os resultados dos testes indicam que o sistema atende aos objetivos propostos, com desempenho consistente. Observou-se estabilidade nas leituras, mesmo depois de vários testes realizados.

A análise comparativa com trabalhos correlatos evidencia as limitações e os diferenciais da proposta, ao mesmo tempo em que reforça sua pertinência no âmbito das soluções voltadas ao gerenciamento de resíduos domésticos.

Em Rahman et al. (2022), a classificação de resíduos por CNN integrada a *IoT* demonstra alto potencial técnico, porém revela limitações práticas decorrentes do número restrito de classes e da dependência de um arranjo sensorial mais complexo. Em contraste, este projeto privilegia simplicidade operacional e baixo custo ao focar-se em etiquetagem via *QR Code*, reduzindo barreiras de adoção doméstica (instalação, manutenção e calibração).

5 CONCLUSÃO

O presente artigo apresentou o desenvolvimento e a validação do ECOTAG, um sistema de etiquetagem e separação automatizada de resíduos domésticos baseado em *QR Codes* e Internet das Coisas (*IoT*). A proposta visou promover a segregação correta dos resíduos na origem, por meio de um protótipo de baixo custo, de fácil replicação e com potencial educativo e ambiental.

Os resultados experimentais comprovaram a viabilidade técnica e funcional da solução, alcançando taxa de acerto de 100% na leitura dos

QR Codes e tempo médio de resposta inferior a 1 segundo. Esses indicadores evidenciam a precisão e a estabilidade do sistema, demonstrando que a combinação entre ESP32-CAM, Arduino Uno e servo motor é adequada para aplicações residenciais de triagem inteligente.

Do ponto de vista técnico, o ECOTAG diferencia-se por adotar uma arquitetura modular (composta por um módulo leitor físico e um módulo web independente), o que favorece a escalabilidade e a integração futura com outras plataformas de coleta e monitoramento ambiental. Em termos econômicos, o projeto também se destaca pelo baixo custo de implementação (aproximadamente R\$ 60,00 para o componente principal), tornando-o acessível para fins educacionais, domésticos e comunitários.

Em comparação com soluções mais complexas baseadas em visão computacional ou aprendizado profundo, como as de Rahman et al. (2022), o sistema desenvolvido oferece simplicidade operacional e alta eficiência, o que o torna especialmente adequado a contextos domésticos e escolares. Além disso, ao atuar na etapa inicial do ciclo de descarte, complementa iniciativas de compostagem de Castro e Lafratta (2020) e coleta inteligente de (Lima et al., 2022), reforçando o ecossistema de tecnologias voltadas à economia circular.

Entre as limitações identificadas, destacam-se a ausência de alimentação autônoma (dependência de energia elétrica direta) e o número reduzido de compartimentos disponíveis. Para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação das categorias de resíduos (incluindo eletrônicos e vidro), a integração com esteiras automatizadas internas e o uso de alimentação por baterias recarregáveis ou energia solar, ampliando a autonomia e a sustentabilidade do sistema.

Conclui-se, portanto, que o ECOTAG representa uma solução viável, replicável e socialmente relevante para o gerenciamento de resíduos domésticos, contribuindo para a educação ambiental, a redução do descarte inadequado e o fortalecimento de práticas sustentáveis no cotidiano das residências. Sua adoção pode servir como base para políticas públicas de incentivo à coleta seletiva inteligente e como ferramenta pedagógica para formação de cidadãos mais conscientes quanto à gestão dos recursos ambientais.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, G. G. F. de; SILVEIRA, R. C. E. da; ENGEL, V. **Coleta e reciclagem de resíduos sólidos urbanos: contribuição ao debate da**

sustentabilidade ambiental. [S.l.: s.n.], 2020. v. 12. 289–310 p.

ARALDI, R. et al. **Inovação e desenvolvimento sustentável: Um estudo de caso sobre os efeitos do uso do aplicativo para gestão de resíduos sólidos em São José do Herval-RS.** [S.l.: s.n.], 2021. v. 10. 1–14 p.

CASTRO, M. A. S. de; LAFRATTA, J. M. **Aplicação dos conceitos e ferramentas de IoT à gestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos: uma exploração inicial.** [S.l.: s.n.], 2020. v. 1. 242–256 p.

DUQUE, C. A.; CARBO, L.; PEREIRA, M. S. d. A. **aplicativo quick response (qr code) no ensino de ciências: utilização em área em recuperação ambiental.** [S.l.: s.n.], 2017.

FERREIRA, G. de L.; SAMBINELLI, F. **Recycler: Um aplicativo móvel colaborativo para reciclagem de materiais.** 2017.

FERREIRA, R. A. da S. **A Importância da Educação Ambiental Para a Busca da Sustentabilidade e Construção da Cidadania.** [S.l.: s.n.], 2022. v. 1. 297–313 p.

GÓMEZ-SANABRIA, A.; LINDL, F. **The crucial role of circular waste management systems in cutting waste leakage into aquatic environments.** [S.l.]: Nature Publishing Group UK London, 2024. v. 15. 5443 p.

LARA, D. M. de et al. **Novas tecnologias aliadas ao desenvolvimento sustentável: criação de app para monitoramento de pontos inadequados de descartes de resíduos.** [S.l.: s.n.], "2020". v. 9. 433–452 p.

LIMA, I. d. A. et al. **Uso de IoT para auxiliar na coleta de lixo urbano.** [S.l.], 2022. 334–341 p.

MAV, S. J.; LORASQUI, R. **Proposta de um aplicativo móvel para localização de pontos de descarte de resíduos especiais.** Rev Cient. Multidisc. Núcleo Conhec, 2017, v. 5, n. 1, p. 912–921.

MOLINARI, D. d. R. **Entre o luxo e o lixo: desafios da sociedade de consumo na gestão dos resíduos sólidos.** [S.l.: s.n.], 2015.

OLIVEIRA, J. T. de; MACHADO, R. d. C. D.; OLIVEIRA, E. M. de. **Educação ambiental na escola: um caminho para aprimorar a percepção dos alunos quanto à importância dos recursos hídricos.** [S.l.: s.n.], 2015. v. 11.

RAHMAN, M. W. et al. **Intelligent waste management system using deep learning with IoT.** [S.l.]: Elsevier, 2022. v. 34. 2072–2087 p.

RIBAS, A. C. et al. **O uso do aplicativo QR code como recurso pedagógico no processo de ensino e aprendizagem.** [S.l.: s.n.], 2017.

SILVA, S. P. A organização coletiva de catadores de material reciclável no Brasil: dilemas e potencialidades sob a ótica da economia solidária. [S.l.], 2017.