

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

Pedro Isaias Queiroz Rocha

Sistema IoT Aplicado a Otimização da Coleta de Resíduos

Fortaleza, Ceará

2022

Pedro Isaias Queiroz Rocha

Sistema IoT Aplicado a Otimização da Coleta de Resíduos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Internet das Coisas e Redes de Sensores.

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes Orientador

Fortaleza, Ceará

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

R672s Rocha, Pedro Isaias Queiroz.
 Sistema IoT Aplicado a Otimização da Coleta de Resíduos / Pedro Isaias Queiroz Rocha. - 2022.
 86 f. : il. color.

 Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações,
Campus Fortaleza, 2022.
 Orientação: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes.

1. Reciclagem. 2. Protótipo. 3. Sensores. 4. Painel de Classificação. I. Título.

CDD 621.382

Pedro Isaias Queiroz Rocha

Sistema IoT Aplicado a Otimização da Coleta de Resíduos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações. Área de concentração: Internet das Coisas e Redes de Sensores.

Aprovado em: ____ / ____ / ____ .

Banca Examinadora

Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes
Orientador
Instituto Federal do Ceará

Prof. Dr. Glendo de Freitas Guimarães
Membro Interno
Instituto Federal do Ceará

Prof. Dr. Joel José Puga Coelho Rodrigues
Membro Externo
Faculdade SENAC do Ceará

Fortaleza, Ceará
2022

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e pelas pessoas que colocaste em meu caminho.

À minha Mãe, Pai, irmãos, tios e a todos que me permitiram chegar até aqui, através do amor e apoio que me providenciaram, sem os quais não estaria onde estou.

Aos grandes amigos que fiz ao longo do meu tempo no IFCE, dos quais posso destacar: Sarah, Raiane, Brenon, Luzyane, Emiliane, Joyce, Calina e a todos que tornaram a minha passagem pelo IFCE única. Gostaria de agradecer o Gustavo e o Filipe, colegas do laboratório GDESTE, pela contribuição direta no projeto e pela amizade.

Aos amigos e professores Wally e Jorge, por acreditarem na minha capacidade e no potencial do projeto, além de todo o apoio que me providenciaram ao longo do Mestrado.

À minha noiva Dyane, por tornar a minha vida muito mais feliz, através de todo amor e apoio que me deste, incluindo toda a ajuda no desenvolvimento da dissertação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

“Não existe um caminho para a felicidade. A felicidade é o caminho.”
(Mahatma Gandhi)

RESUMO

Em decorrência do gradativo aumento populacional, a preocupação com a destinação do lixo gerado pela população se amplia em virtude dos diversos transtornos que o lixo gerenciado de forma inapropriada causa a sociedade. Tais transtornos podem ser minimizados através da prática da reciclagem. Esta dissertação tem como finalidade desenvolver um protótipo de baixo custo capaz de identificar diferentes tipos de resíduos recicláveis, através do desenvolvimento de um sistema de classificação composto por sensores. A primeira etapa consistiu em definir o público alvo do protótipo e quais os resíduos mais descartados pelo público abordado. Na sequência, foram analisadas as propriedades térmicas, ópticas, elétricas e magnéticas dos resíduos estudados, visando encontrar sensores no mercado que fossem capazes de detectá-los satisfatoriamente. Após a definição dos sensores, foi realizada a programação do sistema de classificação dos materiais. Posteriormente, foi desenvolvida a estrutura do protótipo, além da implementação de mecanismos que adicionaram recursos ao sistema, como a abertura da tampa da respectiva lixeira, conforme o material identificado, além do uso de células de carga responsáveis por informar qual o peso dos resíduos descartados. As informações geradas pelos sensores referentes ao tipo do material identificado e ao peso descartado foram enviadas para um servidor web a cada utilização do sistema. O painel de classificação desenvolvido classificou satisfatoriamente os resíduos metálicos, alcançando um percentual de 97,67% de taxa de acerto, porém não foi capaz de classificar fios metálicos de diâmetro reduzido. No que se refere aos resíduos orgânicos, vidros e plásticos, o sistema os classificou corretamente em todas as tentativas realizadas, alcançando uma taxa de 100% de acerto. O tipo de material que obteve um menor percentual de acerto pelo sistema foi o papel, obtendo 80% de taxa de acerto, devido a sua espessura reduzida. Nos casos em que estavam dobrados ou amassados, o sistema os classificou com maior facilidade. À medida que os testes referentes às células de carga foram realizados, foi observado que quanto maior a inclinação da célula de carga presente no interior da lixeira, maior foi a variação do peso calculado. Além disso, outro fator que aumentou a variação descrita foi o peso do material. À medida que o peso do material crescia, também crescia a variação dos pesos calculados pelos sensores. A utilização da plataforma Ubidots possibilitou a criação de dashboards que apresentaram o peso atual presente em cada lixeira e o peso dos materiais depositados pelos usuários a cada utilização do sistema. Considerando os resultados obtidos, o trabalho desenvolvido apresentou avanços nos estudos relacionados à classificação de materiais a partir de sensores, através do desenvolvimento de um protótipo eficiente e de baixo custo.

Palavras-chaves: Reciclagem; Protótipo; Sensores; Painel de Classificação.

ABSTRACT

As a result of the gradual increase in population, the concern with the disposal of waste generated by the population is amplified due to the various nuisances that improperly managed waste causes to society. These problems can be minimized through the practice of recycling. This dissertation aims to develop a low-cost prototype capable of identifying different types of recyclable waste, through the development of a classification system composed of sensors. The first step consisted in defining the prototype's target audience and which were the most discarded wastes. Next, the thermal, optical, electrical, and magnetic properties of the residues studied were analyzed, aiming to find sensors in the market that were able to detect them satisfactorily. After the sensors were defined, the programming of the material classification system was done. Later, the structure of the prototype was developed, besides the implementation of mechanisms that added resources to the system, such as opening the lid of the respective bin, according to the material identified, and the use of load cells responsible for informing the weight of the discarded waste. The information generated by the sensors regarding the type of material identified and the discarded weight were sent to a web server at each use of the system. The developed classification panel satisfactorily classified metallic waste, reaching a 97.67% success rate, but was not able to classify small diameter metallic wires. As for the organic, glass and plastic wastes, the system classified them correctly in all attempts, reaching a 100% success rate. The type of material that obtained a lower percentage of correct answers by the system was paper, obtaining 80% of correct answers, due to its reduced thickness. In cases where they were folded or crumpled, the system classified them more easily. As the tests referring to the load cells were performed, it was observed that the greater the inclination of the load cell inside the bin, the greater was the variation of the calculated weight. In addition, another factor that increased the variation described was the weight of the material. As the weight of the material increased, so did the variation in the weights calculated by the sensors. The use of the Ubidots platform allowed the creation of dashboards that presented the current weight present in each bin and the weight of the materials deposited by users at each use of the system. Considering the results obtained, the developed work presented advances in studies related to the classification of materials from sensors, through the development of an efficient and low-cost prototype.

Keywords: Recycling; Prototype; Sensors; Classification Panel.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Distribuição dos municípios com iniciativas de coleta seletiva no Brasil e regiões (%)	18
2	Etapas do gerenciamento de RSUs	22
3	Processos da IoT	25
4	Participantes do ecossistema da IoT	26
5	Arquitetura de um nó sensor	28
6	Modelo de rede com nós gateway e sink	31
7	Desafios das Redes de Sensores Sem Fio	32
8	Componentes de um nó sensor	45
9	Diagrama de blocos do sensor de proximidade indutivo	50
10	Diagrama de blocos do sensor de proximidade capacitivo	51
11	Simbologia de identificação de alguns tipos de materiais	58
12	Escopo do painel de classificação	60
13	Fluxograma do sistema	61
14	Painel de classificação após a inicialização do sistema	64
15	Sistema completo	65
16	Painel de classificação após a identificação do material pelo sensor ultrassônico	65
17	Classificação do material	66
18	Abertura da lixeira	66
19	Mensagem apresentada no momento em que a tampa da lixeira está aberta	67
20	Mensagem apresentada no momento em que o peso do material depositado é apresentado	67
21	Lixeiras	74
22	Célula de carga posicionada sob uma plataforma	75
23	Dashboard que apresenta o peso atual presente nas lixeiras	78
24	Dashboard que apresenta os depósitos realizados pelos usuários	78

LISTA DE TABELAS

1	Disposição final de RSUs no Brasil e regiões em 2021, por tipo de destinação (toneladas/ano e %)	17
2	Especificações Técnicas do Arduino Mega 2560	47
3	Especificações Técnicas do Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01S	48
4	Especificações Técnicas do Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04	49
5	Especificações Técnicas do Sensor Indutivo LJ12A3-4-Z/BX	50
6	Especificações Técnicas do Sensor Capacitivo LJC18A3-B-Z/BX	52
7	Especificações Técnicas do Micro Servo Hextronik HXT900	52
8	Especificações Técnicas do Micro Servo Turnigy TG9e	53
9	Especificações Técnicas do Módulo HX711	53
10	Especificações Técnicas da Célula de Carga de 10 kg	54
11	Especificações Técnicas do Display LCD 16x2	54
12	Constante dielétrica de alguns materiais	55
13	Constante dielétrica dos principais tipos de plástico	56
14	Tabela de custos do sistema	62
15	Percentual de aceitação dos resíduos de metal	70
16	Percentual de aceitação dos resíduos orgânicos	70
17	Percentual de aceitação dos resíduos de vidro	71
18	Percentual de aceitação dos resíduos de papel	72
19	Percentual de aceitação dos resíduos de plástico	73
20	Métrica de Avaliação	74
21	Comparação dos pesos medidos por uma balança convencional e os sensores de peso presentes nas lixeiras	75
22	Erros relativos percentuais	76
23	Média dos erros relativos percentuais	77

LISTA DE QUADROS

1	Ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de RSUs	22
2	Cores da coleta seletiva	23
3	Alternativas tecnológicas para tratamento de RSUs	24
4	Requisitos técnicos das tecnologias de comunicação para IoT	38
5	Requisitos de expansão das tecnologias de comunicação para IoT	39
6	Sensores utilizados em trabalhos acadêmicos para classificação de resíduos . .	42
7	Tipos de materiais identificáveis pelos sistemas analisados	42
8	Exemplos de resíduos reaproveitáveis e não reaproveitáveis	57
9	Lógica de classificação dos resíduos	59
10	Materiais testados em suas respectivas classificações	68
11	Descarte dos resíduos de metal	70
12	Descarte dos resíduos orgânicos	71
13	Descarte dos resíduos de vidro	71
14	Descarte dos resíduos de papel	72
15	Descarte dos resíduos de plástico	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RSU	Resíduo Sólido Urbano
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Urbana
IoT	Internet das Coisas
GEE	Gases de Efeito Estufa
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
ProteGEEr	Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos na Gestão de Resíduos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
IBSG	Internet Business Solutions Group
IR	Infrared
LCD	Liquid Crystal Display
ADC	Analog to Digital Converter
AD	Analog to Digital
RF	Rádiofrequência
PTP	Point-to-point
FFD	Full Function Device
RFD	Reduced Function Device
QoS	Quality of Service
DC	Direct Current
LDR	Light Dependent Resistor

CPU	Central Processing Unit
RAM	Random Access Memory
ROM	Read Only Memory
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
WLAN	Wireless Local Area Network
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
WECA	Wireless Ethernet Compatibility Alliance
ISM	Industrial, Scientific and Medical
AP	Access Point
BSS	Basic Service Set
SSID	Service Set Identifier
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FHSS	Frequency-hopping Spread Spectrum
FCC	Federal Communications Commission
CCK	Complementary Code Keying
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
FDM	Frequency Division Multiplexing
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
SDM	Spatial Division Multiplexing
SU-MIMO	Single-User MIMO
MU-MIMO	Multi-User MIMO
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
PWM	Pulse Width Modulation
UART	Universal Asynchronous Receiver / Transmitter
USB	Universal Serial Bus

ICSP	In Circuit Serial Programming
CC	Corrente Contínua
CA	Corrente Alternada
SG	Strain Gage
LED	Light Emitting Diode
PET	Poli(Tereftalato de Etileno)
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PVC	Poli(Cloreto de Vinila)
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PC	Policarbonato
PE	Polietileno
PLA	Poly lactide
API	Application Programming Interface
VP	Verdadeiro Positivo
VN	Verdadeiro Negativo
FP	Falso Positivo
FN	Falso Negativo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivo Geral	19
1.2.1	Objetivos Específicos	19
1.3	Organização da Dissertação	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	Resíduos Sólidos Urbanos	21
2.2	Etapas do Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos	22
2.2.1	Geração	22
2.2.2	Coleta	22
2.2.3	Estação de Transferência/Triagem	23
2.2.4	Tratamento	23
2.2.5	Disposição Final	24
2.3	Internet das Coisas	25
2.4	Redes de Sensores Sem Fio	26
2.4.1	Características	27
2.4.2	Arquitetura	28
2.4.2.1	Controlador	28
2.4.2.2	Memória	29
2.4.2.3	Sensores e Atuadores	29
2.4.2.4	Dispositivo de Comunicação	29
2.4.2.5	Fonte de Energia	30
2.4.3	Tipos de Nós Sensores	30
2.4.4	Desafios das Redes de Sensores Sem Fio	31
2.5	Tecnologia Wi-Fi	34
2.5.1	IEEE 802.11 (Wi-Fi 0)	35
2.5.2	IEEE 802.11b (Wi-Fi 1)	35
2.5.3	IEEE 802.11a (Wi-Fi 2)	36
2.5.4	IEEE 802.11g (Wi-Fi 3)	36
2.5.5	IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)	36
2.5.6	IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)	37
2.5.7	IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)	37
2.6	Conectividade IoT	38
2.7	Revisão Bibliográfica	39
2.7.1	Discussão	42

3	MATERIAL E MÉTODOS	44
3.1	Etapas de Desenvolvimento	44
3.2	Definição do Público Alvo	44
3.3	Componentes de um Nó Sensor	45
3.3.1	<i>Unidade de Energia</i>	45
3.3.2	<i>Unidade de Sensoriamento</i>	46
3.3.3	<i>Unidade de Computação</i>	46
3.3.4	<i>Unidade de Comunicação</i>	46
3.4	Hardware	47
3.4.1	<i>Arduino Mega 2560</i>	47
3.4.2	<i>Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01S</i>	48
3.4.3	<i>Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04</i>	48
3.4.4	<i>Sensor de Proximidade Indutivo</i>	49
3.4.5	<i>Sensor de Proximidade Capacitivo</i>	50
3.4.6	<i>Micro Servo Motor</i>	52
3.4.7	<i>Módulo Conversor HX711</i>	53
3.4.8	<i>Célula de Carga</i>	53
3.4.9	<i>Display LCD 16x2</i>	54
3.5	Constante Dielétrica	55
3.5.1	<i>Plásticos Polares e Apolares</i>	55
3.6	Análise dos Materiais	56
3.7	Protótipo	58
3.7.1	<i>Sistema de Classificação</i>	58
3.7.1.1	<i>Calibração</i>	58
3.7.1.2	<i>Lógica de Classificação</i>	59
3.7.2	<i>Estrutura do Sistema e Mecanismo de Seleção</i>	59
3.7.3	<i>Custos</i>	61
3.8	Ubidots	62
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	Desempenho e Limitações do Painel de Classificação	68
4.1.1	<i>Tipos de Resíduos</i>	69
4.1.1.1	<i>Metais</i>	69
4.1.1.2	<i>Orgânicos</i>	70
4.1.1.3	<i>Vidros</i>	71
4.1.1.4	<i>Papéis</i>	71
4.1.1.5	<i>Plásticos</i>	72
4.1.2	<i>Métrica de Avaliação</i>	73
4.2	Análise da Precisão dos Sensores de Peso	74
4.3	Visualização das Informações dos Sensores de Peso	77

5	CONCLUSÕES	79
5.1	Trabalhos Futuros	80
	REFERÊNCIAS	81

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência do gradativo aumento populacional, a necessidade de se produzir produtos de consumo cresce significativamente, tornando cada vez mais importante a implantação de sistemas de gerenciamento de resíduos que incluam os processos de coleta, transporte, descarte e reciclagem dos resíduos, visando atender as demandas geradas pelo aumento populacional. O tratamento inteligente do lixo urbano é de grande importância para o processo de criação de uma cidade inteligente, além de tratar de diversos problemas associados a ele (ZHU *et al.*, 2019). Os métodos utilizados podem variar entre ambientes urbanos e rurais, de acordo com a realidade de cada local. Segundo os dados apresentados em IBGE (2022), as projeções do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) indicam que existem pouco mais de duzentos e quatorze milhões de brasileiros em todo o território nacional, com uma taxa de aumento populacional de vinte e um segundos.

O alto consumo da população gera uma grande quantidade de resíduos, que precisam ter uma destinação apropriada, buscando-se evitar os impactos negativos causados pelo descarte inadequado. A gestão ambiental de resíduos sólidos urbanos (RSUs) tornou-se um desafio global devido ao elevado crescimento populacional, rápida urbanização, alto nível de industrialização mundial e recursos limitados (HAZRA; GOEL, 2009). Os governos locais são responsáveis pela coleta e descarte dos resíduos gerados em sua jurisdição, bem como pela operação e manutenção de seus equipamentos, mas devido a falta de recursos para realizar o tratamento adequado dos resíduos, não é possível fornecer um serviço satisfatório (YOADA; CHIRAWURAH; ADONGO, 2014). Em virtude da realidade descrita, as entidades governamentais são estimuladas a desenvolver políticas que incentivem o desenvolvimento de tecnologias que possibilitem uma melhor gestão dos resíduos.

O panorama de Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) no Brasil em 2021, disponibilizado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) em ABRELPE (2021), pode ser visualizado através da Tabela 1. O estudo retratado em demonstra que houve um aumento expressivo na geração de RSUs em 2020, sobre influência direta da pandemia da COVID-19, tendo alcançado aproximadamente 82,5 milhões de toneladas geradas, com cada brasileiro gerando em média 1,07 kg de resíduo por dia. O estudo também atesta que a maior parte dos RSU coletados seguiram para aterros sanitários, enquanto 39,8% do total dos resíduos seguiram para uma disposição inadequada, incluindo lixões e aterros controlados.

Tabela 1 – Disposição final de RSUs no Brasil e regiões em 2021, por tipo de destinação (toneladas/ano e %)

Região	Disposição adequada		Disposição inadequada	
	t/ano	%	t/ano	%
Norte	1.773.927	35,6%	3.209.013	64,4%
Nordeste	6.016.948	36,3%	10.558.666	63,7%
Centro-Oeste	2.456.849	42,5%	3.323.972	57,5%
Sudeste	29.542.830	73,4%	10.706.257	26,6%
Sul	6.011.894	70,8%	2.479.482	29,2%
Brasil	45.802.448	60,2%	30.277.390	39,8%

Fonte: Adaptada de (ABRELPE, 2021).

São diversos os problemas relacionados ao descarte incorreto do lixo, prejudicando diretamente a sociedade. Caso os resíduos não sejam tratados adequadamente, representam uma ameaça à saúde pública e ao meio ambiente (WILSON *et al.*, 2015). A disposição final a céu aberto gera diversos impactos ambientais, apresentando como exemplos: impactos visuais, contaminação do ar, emissão de gases de efeito estufa (GEE), vetores de doenças, odores, poluição das águas superficiais e subterrâneas (FERRONATO; TORRETTA, 2019).

Internet das Coisas (IoT) é o meio como os objetos físicos são conectados através de sensores inteligentes e softwares que enviam dados para uma rede, onde os objetos podem se comunicar entre si e com o usuário, como um sistema nervoso que possibilita a troca de informações entre diversos pontos. A Internet das Coisas permite a implantação de uma variedade de serviços eficientes e a utilização de redes inteligentes, aplicativos ou dispositivos (NIŽETIĆ *et al.*, 2020). Com o surgimento frequente de novas tecnologias, pode-se citar as comunicações sem fio, que através do desenvolvimento de aplicações móveis e do avanço na área de microeletrônica, tornou-se possível a utilização de redes de sensores sem fio (RSSFs) como uma solução eficiente dentro de uma diversa gama de aplicações. Uma RSSF pode ser descrita como uma rede de nós que possui a capacidade de detectar e controlar parâmetros do ambiente, permitindo a interação entre pessoas ou computadores com o ambiente ao redor (VERDONE *et al.*, 2008).

Neste contexto, o presente trabalho propõe a criação de um protótipo composto por sensores capazes de classificar diferentes tipos de materiais recicláveis de forma automática. O projeto tem como objetivo a criação de novas formas de aumentar o volume de RSUs reaproveitados e motivar as pessoas a descartarem o lixo em locais adequados, proporcionando um aumento da reciclagem e da coleta seletiva, trazendo diversos benefícios à população.

1.1 Justificativa

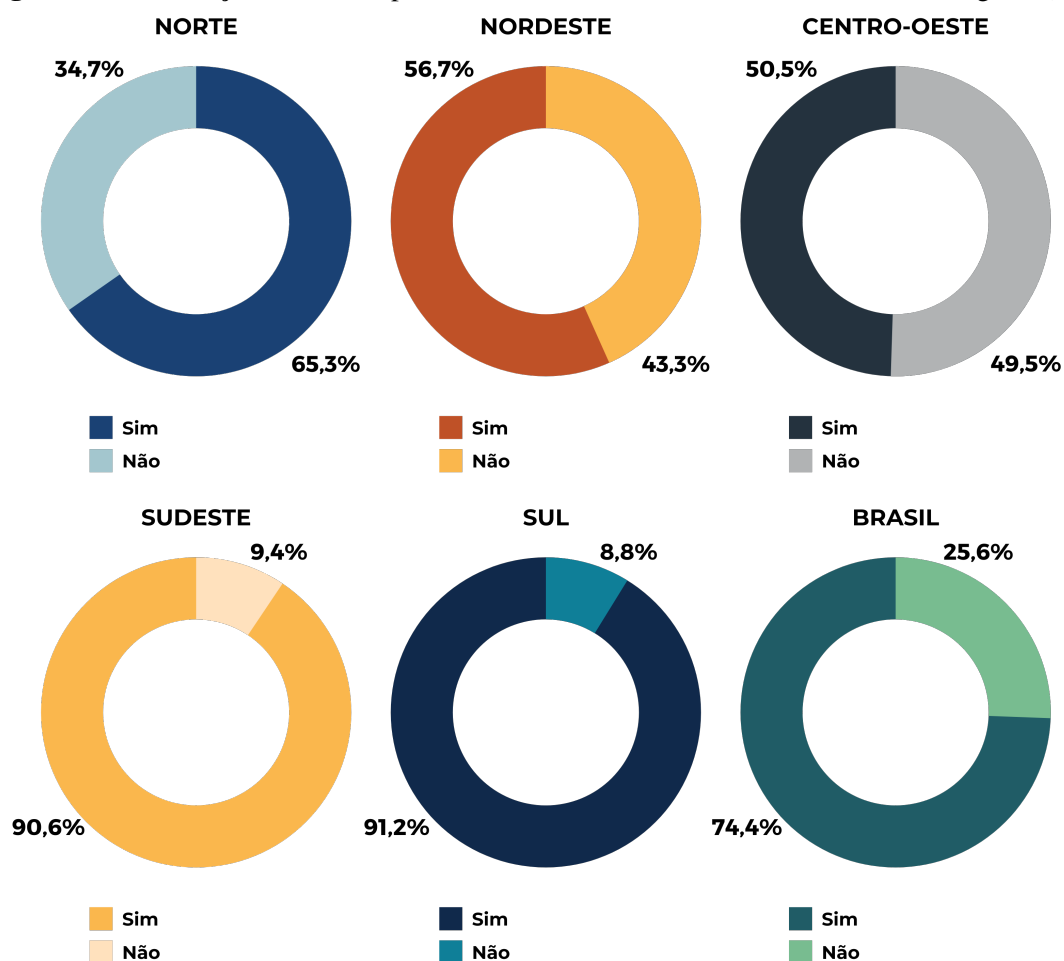
Existe um fator urbano preocupante relacionado à coleta e destinação inadequada de resíduos pela sociedade, que proporciona o acúmulo de lixo em calçadas, áreas de lazer e em outros tipos de locais, causando obstrução e levando a problemas de inundação. Para o setor privado, existe um grande acúmulo de resíduos que não recebem uma separação adequada de lixo

reutilizável. Considerando o cenário descrito, as RSSFs fornecem uma gama de possibilidades para o desenvolvimento de projetos de sensores sem fio que possam transmitir informações úteis para gestão dos resíduos provenientes de áreas públicas e privadas.

A busca por formas de otimizar o gerenciamento dos resíduos gerados é compreensível, devido às alterações que podem ser causadas no ambiente. A produção de lixo nas cidades é de tal intensidade que não é possível conceber a ideia de uma cidade sem levar em consideração a problemática gerada pelos resíduos sólidos (MUCELIN; BELLINI, 2008). Os resíduos sólidos urbanos representam uma ameaça à saúde pública e ao meio ambiente se não forem gerenciados com segurança, o que envolve os processos de separação, coleta, transferência, tratamento e descarte ou reciclagem e reutilização (VINTI *et al.*, 2021).

Ainda segundo a pesquisa desenvolvida em ABRELPE (2021), em 2020, o percentual de municípios que apresentaram alguma iniciativa de coleta seletiva foi de 74,4% do total de municípios do país, mas apesar desse dado positivo, em muitos municípios as atividades de coleta seletiva não abrangem a totalidade da população, podendo representar apenas iniciativas pontuais. A distribuição dos municípios com iniciativas de coleta seletiva no Brasil pode ser visualizada por meio da Figura 1.

Figura 1 – Distribuição dos municípios com iniciativas de coleta seletiva no Brasil e regiões (%)



Fonte: Adaptada de (ABRELPE, 2021).

Em locais de grande circulação de pessoas como praças, centros comerciais, praias, mercados, entre outros, muitas pessoas descartam os resíduos de forma incorreta (ABDEL-SHAFY; MANSOUR, 2018). Outro fator que impossibilita uma maior taxa de destinação adequada dos resíduos sólidos é a ausência de lixeiras seletivas, desperdiçando a possibilidade de reaproveitamento desses materiais.

Devido ao baixo consumo, custo reduzido e maior escalabilidade se comparado a outros tipos de rede, as RSSFs possuem um grande potencial que possibilita um aumento na quantidade de dispositivos, no monitoramento e uma integração remota com aspectos do mundo físico através de sensores que facilitam a criação de novos sistemas em áreas que as RSSFs podem ser utilizadas, através da coleta de dados (WARNEKE; PISTER, 2002).

O trabalho em questão tem como objetivo a criação de um sistema de identificação automática de materiais recicláveis. Com o desenvolvimento do projeto, novas maneiras para aumentar a quantidade de RSUs reaproveitados se tornam possíveis, além de motivar as pessoas a descartarem os resíduos em locais adequados. O sistema também proporcionará uma redução de gastos financeiros necessários para realizar a separação dos resíduos entre os tipos de materiais recicláveis, redução de gases de efeito estufa, prevenção à saúde pública evitando o acúmulo demasiado de resíduos em ambientes públicos, bem como casos de entupimento devido aos resíduos acumulados em bueiros.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema capaz de otimizar o processo de descarte de resíduos sólidos urbanos.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Montar o circuito eletrônico responsável pela classificação dos materiais;
- Programar o sistema que executará a identificação de materiais de forma automática;
- Implementar um sistema de comunicação responsável pelo envio dos dados ao servidor web;
- Desenvolver uma interface gráfica para visualização dos dados coletados.

1.3 Organização da Dissertação

Este trabalho está organizado como segue. O Capítulo 2 explora os conceitos básicos relacionados a redes de sensores sem fio e ao gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Além disso, o Capítulo descrito apresenta trabalhos correlatos a partir de artigos e dissertações relacionadas a sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

O Capítulo 3 traz os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento do protótipo, apresentando a arquitetura de hardware e software implementada. Ao final deste Capítulo tem-se o levantamento dos custos para a montagem do protótipo.

No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos, enfatizando os testes realizados para avaliar o desempenho e as limitações do sistema.

Por último, o Capítulo 5 expõe as conclusões relacionadas aos resultados obtidos, além de apresentar sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será realizada uma introdução a alguns conceitos e definições importantes para o embasamento deste trabalho. Inicialmente, será apresentada a distinção entre lixo e resíduo sólido. Além disso, serão expostas as etapas e políticas aplicadas no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. Em seguida, será abordada a importância da Internet das Coisas e das redes de sensores sem fio. Ao final do capítulo, serão apresentados trabalhos correlatos a partir de artigos e dissertações relacionadas a sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos.

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os RSUs são definidos como resíduos coletados pelo município ou descartados no local de disposição, incluindo resíduos residenciais, industriais, institucionais, comerciais e de construção (COELHO *et al.*, 2019). A gestão eficiente desses tipos de resíduos depende em grande parte da população e da renda nacional bruta do país (NANDA; BERRUTI, 2020).

As classes de resíduos sólidos dispostas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) em Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004), segundo a Norma Brasileira (NBR) 10004 de 2004, são:

- **Resíduos classe I – Perigosos:** são aqueles que apresentam periculosidade, ou seja, oferecem risco à saúde pública e ao meio ambiente, apresentando uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. Os resíduos perigosos são gerados de muitas fontes, incluindo líquidos, sólidos e gases.

- **Resíduos classe II A – Não inertes:** representa os que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Matéria orgânica vegetal, papéis e plásticos são alguns exemplos da classe em questão.

- **Resíduos classe II B – Inertes:** se diferenciam de resíduos classe II A por não apresentarem solubilidade em água e não serem perigosos. São os que mantêm suas características durante o processo de decomposição. Exemplos: entulhos de demolição, pedras, areia, sucatas de ferro, madeiras, isopor, borrachas, latas de alumínio e vidros.

Segundo o artigo 30.º do decreto 10936/22 que regulamenta a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a ordem de prioridade relacionada à gestão e gerenciamento de resíduos sólidos presente no Quadro 1 deve ser contemplada.

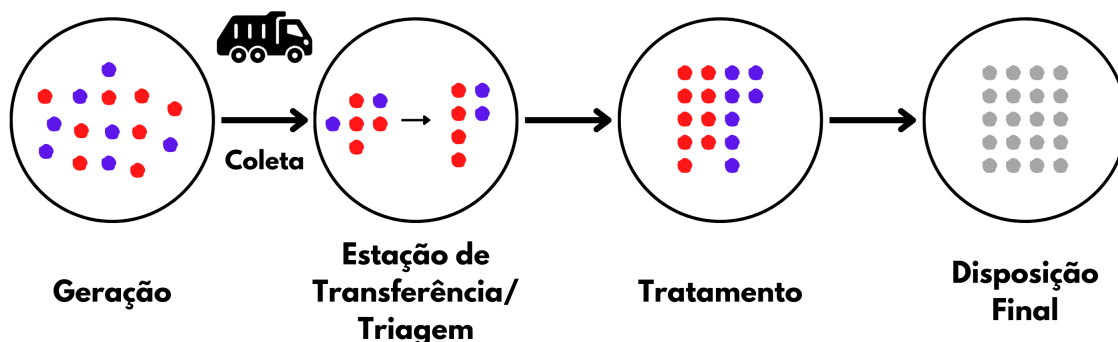
Quadro 1 – Ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de RSUs

I - não geração de resíduos sólidos;
II - redução de resíduos sólidos;
III - reutilização de resíduos sólidos;
IV - reciclagem de resíduos sólidos;
V - tratamento de resíduos sólidos;
VI - disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Fonte: Adaptado de (BRASIL, 2022).

2.2 Etapas do Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

Com base nas informações disponibilizadas pela Cooperação para a Proteção do Clima na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos (ProteGEEr) em ProteGEEr (2017), são cinco as etapas de gerenciamento de RSUs. Na Figura 2 são apresentadas as etapas mencionadas, de acordo com a ordem do processo de gerenciamento de resíduos. Posteriormente, as etapas serão descritas criteriosamente, ainda de acordo com a mesma fonte.

Figura 2 – Etapas do gerenciamento de RSUs

Fonte: Adaptada de ProteGEEr (2017).

2.2.1 Geração

A população gera resíduos em todo local onde se realiza alguma determinada atividade, seja nas residências, ruas ou em estabelecimentos comerciais.

Todo resíduo gerado deve ser acondicionado de forma apropriada, o que representa a colocação dos resíduos sólidos no interior de recipientes apropriados, visando a sua posterior estocagem ou coleta, para que sejam recolhidos pelo serviço de limpeza urbana.

2.2.2 Coleta

O processo da coleta pode ser convencional, quando os resíduos não são separados previamente, ou seletivo, nesse caso, os materiais são segregados segundo a tipologia dos resíduos sólidos recicláveis (ABDEL-SHAFFY; MANSOUR, 2018).

A coleta seletiva possui uma padronização nacional de cores definida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que estabelece um código de cores criado para diferenciar os resíduos de acordo com seu tipo, adotado na identificação de coletores e transportadores, assim como em campanhas informativas. As diferentes categorias de materiais e suas respectivas cores são apresentadas no Quadro 2, segundo a resolução do CONAMA nº 275 de 2001.

Quadro 2 – Cores da coleta seletiva

Padrão de cores	
Azul	Papel/papelão
Vermelho	Plástico
Amarelo	Metal
Verde	Vidro
Preto	Madeira
Laranja	Resíduos perigosos
Branco	Resíduos ambulatoriais e serviços de saúde
Roxo	Resíduos radioativos
Marrom	Resíduos orgânicos
Cinza	Resíduo geral não reciclado ou misturado, ou contaminado não passível de separação

Fonte: Adaptado de CONAMA (2001).

2.2.3 Estação de Transferência/Triagem

As unidades de transferência são situadas próximo à região onde os resíduos são gerados, para que os caminhões de coleta os depositem e retornem para completar seus respectivos percursos. As instalações que executam o processo de triagem participam da cadeia produtiva do processo de reciclagem dos resíduos como uma etapa situada entre a coleta e o processo de reciclagem (PROTEGEER, 2017).

2.2.4 Tratamento

O tratamento dos resíduos compreende uma série de processos físicos, químicos e biológicos, antes da sua disposição final sobre o solo. A adoção do tratamento implica na separação prévia dos resíduos, com base na coleta seletiva. Sem essa coleta, não haverá resultados satisfatórios provenientes do tratamento (ABDEL-SHAIFY; MANSOUR, 2018).

As alternativas ao aterramento de resíduos possibilitam benefícios a longo prazo, reduzindo a poluição do meio ambiente e promovendo benefícios econômicos, além da diminuição do passivo ambiental gerado pelos aterros sanitários. As alternativas para tratamento de RSUs segundo Prates, Pimenta e Ribeiro (2019) são descritas através do Quadro 3.

Quadro 3 – Alternativas tecnológicas para tratamento de RSUs

Tratamento	Benefícios	Dificuldades
Compostagem	- Conversão dos resíduos orgânicos em composto com possibilidade de aplicações diversas; - Tecnologia simples e comprovada; - Aplicável em diversas escalas.	- Podem causar mal cheiro e proliferação de insetos e roedores; - Necessidade de triagem dos RSU; - Necessidade de mercado para comercializar compostos.
Digestão anaeróbica	- Conversão dos resíduos orgânicos em composto e biogás para fonte energética; - Possibilidade de venda de créditos de carbono.	- Sensível a composição heterogênea RSU; - Quantidade de biogás variável.
Incineração	- Maior geração de energia; - Maior redução de massa e volume dos resíduos.	- Maior potencial de geração de dioxinas e furanos; - Maior complexidade de tratamento de gases.
Plasma	- Maior redução de massa e volume.	- Maior complexidade de implantação e operação; - Alto consumo de energia; - Aplicável somente em larga escala.
Pirólise	- Produção de produto carbonizado combustível.	- Operação em batelada; - Consumo de combustível auxiliar para manutenção da temperatura.
Gaseificação	- Produção de gás combustível; - Permite tratamento de resíduos industriais; - Não requer combustíveis auxiliares.	- Maior custo de implantação e operação; - Maior ação de processos corrosivos no equipamento.

Fonte: Adaptado de Prates, Pimenta e Ribeiro (2019).

2.2.5 Disposição Final

Quando os resíduos não passam pela etapa de tratamento, ou seja, quando passam a ser considerados rejeitos, os RSU devem receber uma destinação final.

A disposição representa a distribuição ordenada de rejeitos em lixões, aterros controlados e aterros sanitários, de acordo com normas de operacionalização. As alternativas mais utilizadas na disposição final de lixo no Brasil são analisadas a seguir, segundo Leite *et al.* (2019).

- **Lixão:** representa uma forma inadequada de disposição final de rejeitos, onde são despejados em terrenos baldios ou em qualquer outro local aberto, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

- **Aterro controlado:** é um local preparado para receber resíduos sólidos. Representa evolução com relação aos lixões, pois evitam o contato físico do lixo com seres humanos e

animais, através do cobrimento do lixo, minimizando os impactos ambientais associados ao acúmulo de lixo em áreas sem nenhum tipo de tratamento para efluentes líquidos e preparação do solo. Porém, este tipo de aterro não possui técnicas para evitar os danos causados pela degradação do lixo, que gera o chorume e gases poluentes.

• **Aterro sanitário:** é considerado o local mais adequado para despejar RSU. No aterro sanitário, o chorume e o gás metano são coletados em sistemas próprios de captação. O chorume é direcionado para uma estação de tratamento e o metano para um aparelho denominado flare, que promove sua queima e consequente transformação em gás carbônico. Esse tipo de aterro também possui sistemas impermeabilizantes que impedem que o chorume atinja lençóis freáticos. Assim, conseguem reduzir os impactos ambientais causados pela degradação do lixo.

2.3 Internet das Coisas

A Internet das Coisas representa um paradigma que preconiza um mundo de objetos físicos embarcados com sensores e atuadores, conectados por redes sem fio e que se comunicam usando a Internet, construindo uma rede de objetos inteligentes capazes de processar informações, capturar variáveis ambientais e reagir a estímulos externos (DOMINGUESCHE, 2021). A IoT pode trazer mudanças em muitos campos, pois possui a capacidade de extrair uma grande quantidade de informações a partir da coleta de dados por vários sensores, através de um espaço físico composto por vários objetos específicos representados por sensores (GAO *et al.*, 2021). Ao interligar um conjunto de objetos com diferentes recursos a uma rede, torna-se possível o surgimento de uma gama de novas aplicações.

Figura 3 – Processos da IoT



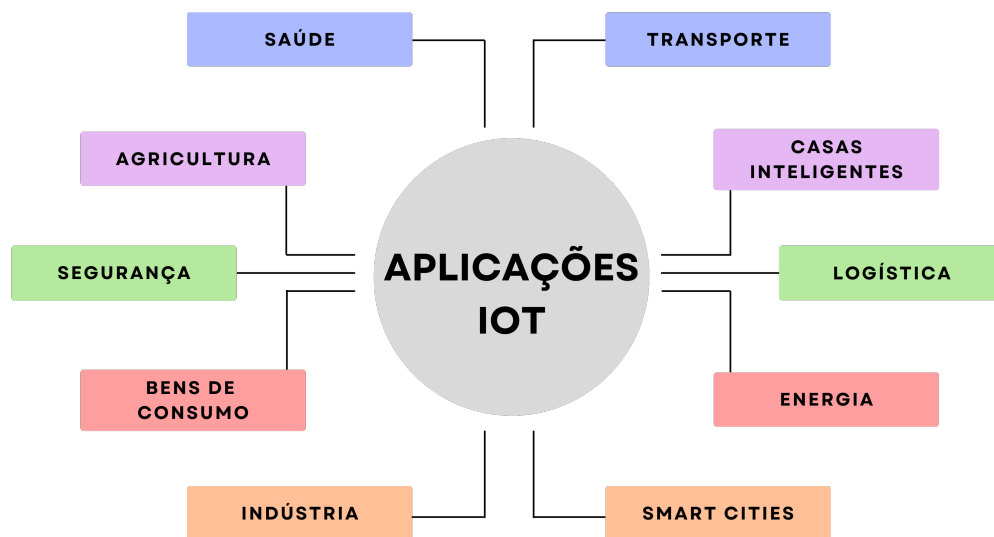
Fonte: Elaborada pelo autor.

Um dos desafios presentes no ambiente de IoT é a heterogeneidade, que representa um cenário onde os objetos podem divergir em diferentes aspectos, como implementação, hardware e qualidade dos componentes. É preciso garantir a confiabilidade dos dados antes de analisá-los, garantindo que os sensores estejam funcionando corretamente e que a qualidade dos dados

usados para análise seja confiável. Nessa perspectiva, as aplicações desenvolvidas precisam se adequar aos desafios relacionados ao tratamento dos dados provenientes dos objetos (LI, 2021).

As aplicações são múltiplas, com a possibilidade da utilização de diferentes tecnologias capazes de fornecer informações relevantes sobre o seu próprio funcionamento, desempenho de uma atividade ou das condições do ambiente que necessitam de monitoramento e gerenciamento remoto. Em grandes indústrias, a Internet das Coisas está começando a fazer parte de todas as etapas de operação, promovendo uma nova economia fomentada por essas tecnologias (OTU, 2019). A IoT pode incluir um grande número de aplicativos projetados para auxiliar diversos setores, como indústria, transporte, mercados, educação, agricultura, saúde, meio ambiente e inteligência cidades. Segundo informações apresentadas por Pardini (2019), de acordo com o Internet Business Solutions Group (IBSG), um marco da IoT ocorreu quando a população da Terra foi excedida pelo número de objetos conectado à Internet, o que aconteceu em 2008-2009. O IBSG prevê que até 2020, cerca de 50 bilhões de dispositivos estarão conectados à Internet. Na Figura 4 são apresentados os diversos setores que podem ser beneficiados com o uso da IoT.

Figura 4 – Participantes do ecossistema da IoT



Fonte: Elaborada pelo autor.

2.4 Redes de Sensores Sem Fio

As RSSFs são compostas por nós sensores, que atuam como geradores de dados e retransmissores dentro de uma topologia de rede. Uma das áreas mais importantes da IoT é a comunicação sem fio, que realiza a comunicação de um ou mais dispositivos sem fio (ERTAM *et al.*, 2020). Cada nó é composto por um sensor ou conjunto de sensores, microcontrolador, memória, transceptor e bateria. Por meio dos sensores, a captura de fenômenos físicos torna-se possível. Através do microcontrolador, os nós sensores podem ser programados para realizar tarefas simples ou complexas, em vez de apenas transmitir as informações captadas. O transceptor fornece conectividade sem fio para comunicar os fenômenos de interesse observados. Devido

ao tamanho discreto, substancial funcionalidade, conectividade e baixo custo, os dispositivos pertencentes a uma RSSF permitem novos métodos de interação com o ambiente, fornecendo mais informações de uma forma menos intrusiva do que antes (WARNEKE; PISTER, 2002). Existe uma grande variedade de cenários onde as redes descritas possuem um grande potencial de utilização, dadas suas características. Nos últimos anos as aplicações de redes de sensores sem fio têm sido amplamente utilizadas e aplicadas em áreas médicas, militares, de monitoramento industrial, agrícola e ambiental (OTHMAN; SHAZALIB, 2012).

O principal problema em redes de sensores sem fio é o curto período de funcionamento devido ao alto consumo de energia e à incompatibilidade entre os hardwares utilizados (ALEXANDER *et al.*, 2015). É possível melhorar o desempenho geral das redes de sensores sem fio através da adoção de tecnologias de localização otimizadas, aumento da eficiência energética do sensor e inclusão de recursos de segurança (YOU; ZHU, 2020). A utilização de sensores que tenham baixo custo é outro fator importante dentro do desenvolvimento desse tipo de rede.

As RSSFs são compostas por um grande número de nós sensores, que são densamente implantados, a fim de permitir uma observação confiável e eficiente. A implantação de nós em uma rede de sensores sem fio pode ser classificada em regular e aleatória. A implantação regular consiste na implantação uniforme de nós sensores no campo de interesse, enquanto na implantação aleatória os nós são lançados pelo ar em ambientes hostis (KATTI; LOBIYAL, 2017). Uma boa implantação de nós sensores permite maximizar a área de cobertura. Para propor posições estáticas para os nós sensores, é preciso estabelecer estratégias para gerenciar e controlar a transmissão de pacotes seguros entre nós sem fio. Além disso, a identificação de nós vizinhos é necessária para trocar as chaves criptográficas e criar um link de comunicação em casos de remoção ou adição de nós sensores, proporcionando uma melhor reconfiguração e reconhecimento da topologia de rede (ELGENAIDI *et al.*, 2017).

2.4.1 Características

Santos e Mansano (2019) caracterizam as redes de sensores sem fio em três elementos principais: sensor, observador e o fenômeno. Os elementos elencados serão descritos a seguir:

O **sensor** realiza o monitoramento físico de um fenômeno e gera informações de acordo com os dados coletados. Os modelos variam de acordo com a necessidade da aplicação e características dos dispositivos nos quais os sensores estão inseridos. As RSSFs podem consistir em diferentes tipos de sensores, incluindo sensores sísmicos, magnéticos, térmicos, visuais, infravermelhos e acústicos, que são capazes de monitorar uma ampla variedade de condições ambientais que incluem temperatura, umidade, pressão, velocidade, direção, movimento, luz, composição do solo, níveis de ruído, presença ou ausência de certos tipos de objetos, entre outras possibilidades de detecção. Como resultado, uma ampla gama de aplicações se torna possível. Na maioria dos modelos de sensores, a capacidade de detecção ou medição diminui com o aumento

da distância entre o sensor e o fenômeno observado, mas com o aumento do tempo de exposição em que o sensor coleta informações, a capacidade descrita é incrementada (COSTA, 2011).

O **observador** representa o indivíduo interessado em obter informações baseadas nos dados coletados pelos sensores. Podem existir múltiplos observadores em uma rede de sensores.

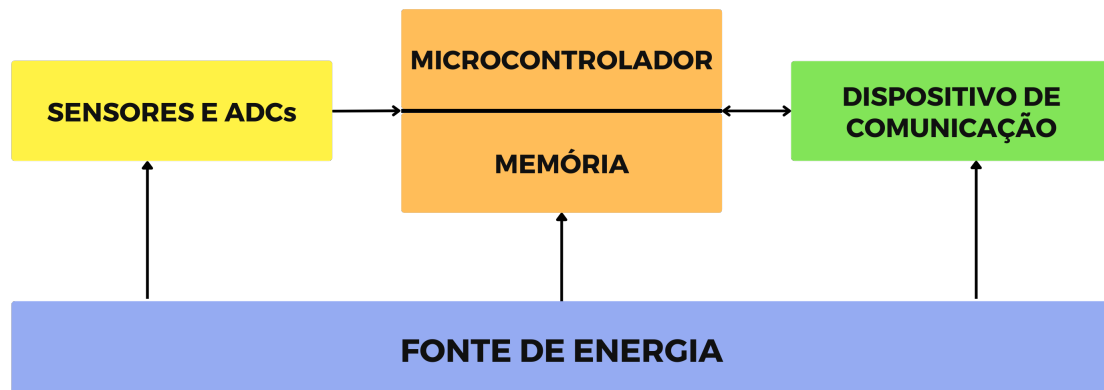
O **fenômeno** consiste na grandeza ou objeto de interesse do observador. Um conjunto de fenômenos podem ser observados em uma rede de sensores.

O objetivo de uma rede de sensores sem fio é coletar informações relativas aos fenômenos observados no interior da área de interesse, processá-las e enviá-las ao observador mediante consultas. Geralmente, cada sensor recolhe amostras discretas de fenômenos e dissemina as informações pela rede, atuando de forma colaborativa.

2.4.2 Arquitetura

A arquitetura básica de uma rede de sensores sem fio possui cinco componentes principais. Um modelo geral para nós sensores é demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Arquitetura de um nó sensor



Fonte: Elaborada pelo autor.

A seguir será realizada uma explanação de cada componente apresentado.

2.4.2.1 Controlador

É responsável por prover a inteligência computacional para realização de funções e tarefas a serem executadas pelo nó sensor. É o controlador que processa os dados relevantes, interpretando instruções de baixo nível e gerenciando o funcionamento dos outros componentes do nó sensor, representando a Unidade Central de Processamento (CPU) do nó. A escolha do controlador depende dos requisitos de performance necessários para execução das tarefas.

2.4.2.2 Memória

Armazena programas e dados temporários. A memória RAM (Random Access Memory) é responsável por armazenar leituras de sensores intermediários, pacotes de outros nós e outros tipos de dados. Embora a memória RAM seja rápida, sua principal desvantagem é que o conteúdo armazenado é perdido caso o fornecimento de energia seja interrompido. Código desenvolvidos para realização de tarefas designadas podem ser armazenados na memória ROM (Read Only Memory) ou, mais tipicamente, na memória EEPROM (Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory) ou memória Flash, que se diferencia da memória EEPROM por permitir que os dados sejam apagados ou gravados em blocos em vez de apenas um byte de cada vez.

2.4.2.3 Sensores e Atuadores

O sensor tem a função de detectar e responder a algum estímulo, sendo classificado em dois tipos: analógico, cuja saída pode assumir quaisquer valores em função do tempo, limitados a sua faixa de operação ou digital, que apresenta dois valores possíveis para sua saída, zero ou um. Depois que o sensor recebe o estímulo, a sua função é emitir um sinal que seja capaz de ser convertido e interpretado pelos outros dispositivos. As RSSFs podem consistir em muitos tipos diferentes de sensores, incluindo sensores sísmicos, magnéticos, térmicos, visuais, infravermelhos e acústicos, que são capazes de monitorar uma ampla variedade de condições ambientais que incluem temperatura, umidade, pressão, velocidade, direção, movimento, luz, composição do solo, níveis de ruído, presença ou ausência de certos tipos de objetos, entre outras possibilidades de detecção. Como resultado, uma ampla gama de aplicações se torna possível.

O atuador é capaz de alterar o estado de algum parâmetro físico, podendo fazer com que um componente mecânico se mova após obter alguma entrada do sensor. Ao receber um sinal do controlador, o atuador age através da conversão do sinal elétrico em uma grandeza física, ou seja, o atuador recebe uma entrada de controle, através de um sinal elétrico e gera uma mudança no sistema físico através da produção de força, calor, movimento e outros tipos de efeitos.

2.4.2.4 Dispositivo de Comunicação

É responsável por enviar e receber informações sobre o canal sem fio, realizando a comunicação entre os nós. A comunicação baseada em radiofrequência (RF) é a mais relevante e a que melhor se adapta aos requisitos da maioria das aplicações em RSSFs por fornecer um alcance relativamente longo, altas taxas de transmissão de dados, taxas de erro aceitáveis com gasto de energia razoável e por não necessitar de uma linha de visada direta entre o remetente e o destinatário. Os transceivers ou radiotransmissores possuem três modos de operação principais: recepção, transmissão e desligado.

2.4.2.5 Fonte de Energia

Componente que fornece a alimentação necessária para o funcionamento adequado do nó sensor. Normalmente a fonte é uma bateria não recarregável e/ou de difícil substituição. Como em geral não há fonte de alimentação conectada ao nó sensor, é necessário uma fonte de energia que supra a demanda do nó sensor, podendo haver um circuito de recarga através da utilização de painéis solares.

2.4.3 Tipos de Nós Sensores

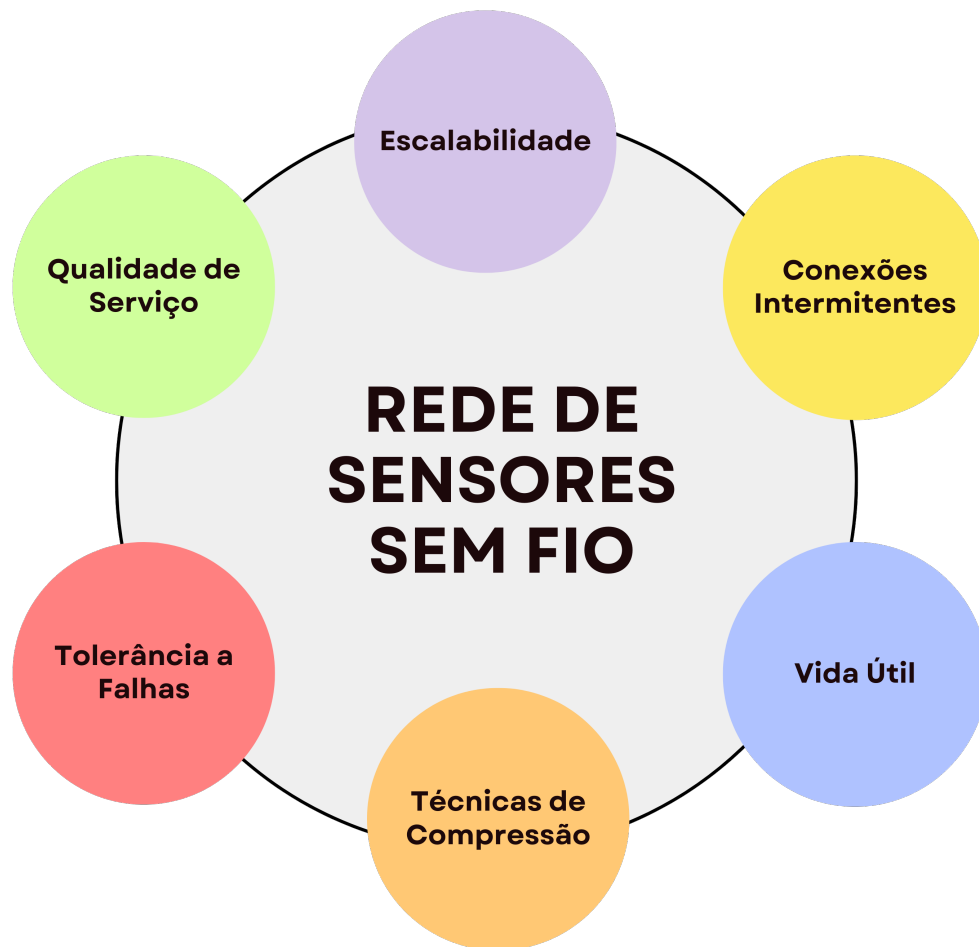
As RSSFs podem apresentar três tipos principais de nós sensores. Os tipos de nós são descritos a seguir:

- **Nó sensor:** responsável por monitorar o ambiente e gerar dados a partir dos fenômenos observados, realizando a transmissão dos dados para o nó sink. Cada nó sensor consiste na unidade de detecção, responsável por monitorar os fenômenos alvos dentro da área de interesse, na unidade de processamento, que realiza a filtragem dos dados detectados, na unidade de transmissão que transfere os dados para o nó sink e na unidade de energia, que promove o fornecimento de energia (AL-RAZGAN; ALFAQIH, 2022).

- **Nó sink:** executa funções colaborativas onde os elementos provêm dados que são processados por nós especiais chamados de nós sink ou sorvedouros. Tem como objetivo concentrar os dados de sensoramento de todos os nós da rede e repassá-los ao usuário que roda a aplicação do sistema. O nó sink não possui as restrições de um nó sensor usual, tendo grande poder de processamento e alta capacidade de armazenamento. Gao *et al.* (2015) realizam um estudo aprofundado sobre os nós em questão, elencando três recursos presentes em nós sink: (1) Autonomia: após a inicialização, os nós sink podem funcionar de forma independente sem intervenção. (2) Reatividade: possuem a capacidade de alterar seu princípio de funcionamento a partir de alguma mudança no ambiente. (3) Colaboração: o modo interativo entre nós sink pode ser ajustado de acordo com a mudança de alguma tarefa, ocorrendo a colaboração entre os nós para a execução de tarefas complexas.

- **Nó gateway:** é responsável por conectar a RSSF a uma outra rede como a Internet, com o objetivo de enviar os dados dos sensores ao computador que roda a aplicação, para que a informação possa ser disponibilizada ao usuário. O nó gateway representa um nó especial que é capaz de se comunicar com os nós sensores, bem como com a rede externa. O nó em questão é considerado como sendo um nó estático sem problemas de energia e com alta capacidade de processamento (MURAT, 2016).

Os tipos de nós decritos são apresentados na Figura 6.

Figura 7 – Desafios das Redes de Sensores Sem Fio

Fonte: Elaborada pelo autor.

• **Tolerância a falhas:** os nós sensores podem apresentar diversos tipos de falhas, como na alimentação e comunicação do nó sensor, dessa forma, é recomendável a utilização de algum grau de redundância. A tolerância a falhas em RSSFs é uma propriedade que consiste no fornecimento contínuo dos serviços em uma rede, apesar da falha de alguns nós sensores (HEDAR *et al.*, 2020). Devido ao fornecimento de energia limitado da bateria e a dificuldade de recarregar ou substituir o nó em que ocorreu a falha, os nós sensores são implantados densamente na área de destino para aumentar a cobertura e a conectividade, para caso algum dos nós sensores venham a falhar, outro possa assumir o seu papel dentro da rede (MUNIR; ANTOON; GORDON-ROSS, 2015).

• **Escalabilidade:** considerando que as RSSFs são capazes de envolver uma quantidade considerável de nós sensores, é importante que as arquiteturas e protocolos de rede desenvolvidos possam lidar com variações na quantidade de nós sensores, permitindo a escalabilidade da rede. Para melhorar o desempenho e gerenciamento da rede, são criados grupos denominados clusters. Os clusters possibilitam uma maior escalabilidade, compartilhamento de dados e uso eficiente de recursos, garantindo uma economia de energia e estabilidade para a rede (KUMAR *et al.*, 2021).

• **Conexões intermitentes:** a forma de comunicação mais utilizada em redes de sensores sem fio é a comunicação por RF, que utiliza o ar como meio de transmissão, com isso, a

comunicação está suscetível a interferências externas, o que aumenta a taxa de perdas de pacotes na transmissão. Caso ocorra falhas nas conexões de rede, faz-se necessário mudanças na topologia da rede e sua reconfiguração (LI; BARTOS, 2013). Antony e Thomas (2018) elencam alguns fatores que acarretam em perda de dados, entre eles: (1) Congestionamento: representa o maior fator de perda de pacotes. À medida que o tráfego aumenta, os pacotes de tráfego podem não chegar ao destino final. (2) Ruído: a presença de ruídos e o desvanecimento dos sinais transmitidos estão entre as condições de canal que podem levar à perda de pacotes ou erros de bits na transmissão do sinal. Devido a esses fatores, os pacotes podem ser descartados. (3) Restrições de energia: os nós que estão com os recursos de energia inferiores ao necessário para o correto funcionamento do dispositivo podem ser desconectados, levando a perda de pacotes.

- **Vida útil:** a eficiência energética representa um dos principais desafios desse tipo de rede, estando diretamente relacionada com a qualidade de serviço. A vida útil do nó sensor depende de diferentes parâmetros como frequência de amostragem, frequência de transmissão, capacidade de processamento e potência de transmissão (YOUNUS, 2018). Outros fatores tais como canal de transmissão, modulação, taxa de transmissão e duração da transmissão e recepção de dados também afetam a vida útil do nó.

- **Qualidade de serviço (QoS):** em redes de computadores, assim como em redes de sensores sem fio, as métricas de performance são utilizadas para avaliar a performance de um determinado sistema, que podem variar de acordo com a aplicação utilizada, com o objetivo de garantir o desempenho necessário do sistema. As métricas de avaliação da qualidade de serviço do sistema envolvem o gerenciamento de parâmetros de atraso no sistema, variação do atraso, perda de pacotes em uma rede e consumo de energia, com o objetivo de encontrar uma configuração adequada para o protocolo de comunicação alcançar uma melhor qualidade de serviço (CEDEÑO; ASQUI; CHAW, 2019).

- **Técnicas de compressão:** a compressão representa um processo de codificação através de um algoritmo capaz de gerar um fluxo de dados codificados e/ou comprimidos. O grau de diminuição dos dados é compreendido como taxa de compressão. Em uma RSSF, a comunicação por RF é a área que frequentemente representa o maior consumo de energia. O aumento da vida útil do nó pode ser alcançado através da redução das transmissões e recepções de dados, utilizando agregação de dados e técnicas de compressão (WANG, 2012). A taxa de compressão pode ser alcançada através da seguinte equação:

$$\text{Taxa de compressão} = \frac{\text{Tamanho do dado comprimido}}{\text{Tamanho do dado original}} \quad (2.1)$$

2.5 Tecnologia Wi-Fi

A tecnologia Wi-Fi representa um conjunto de especificações técnicas baseadas no padrão IEEE 802.11 para redes locais sem fio ou Wireless Local Area Network (WLAN). As redes Wi-Fi estão em contínua expansão, sendo implementadas em ambientes empresariais, domésticos e em hotspots, permitindo que as pessoas tenham acesso a Internet de qualquer lugar a qualquer momento.

Os padrões Wi-Fi tiveram sua origem definida em 1985 por meio da Comissão Federal de Comunicações dos EUA, que liberou as bandas do espectro de radiofrequência de 900 MHz, 2,4 GHz e 5 GHz, para uso não licenciado. As empresas de tecnologia começaram a construir redes e dispositivos sem fio para aproveitar o espectro recém-disponível, mas sem um padrão sem fio comum. Até esse momento, os dispositivos de diferentes fabricantes raramente eram compatíveis. Eventualmente, um comitê de líderes da indústria apresentou um padrão comum, chamado 802.11, que foi aprovado pelo Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) em 1997. Dois anos depois, um grupo de grandes empresas formou a Wireless Ethernet Compatibility Alliance (WECA), que posteriormente teve seu nome alterado para Wi-Fi Alliance. A Wi-Fi Alliance é uma organização global sem fins lucrativos criada para promover o novo padrão sem fio, sendo responsável por definir as regulamentações e certificar que os dispositivos sem fio estejam dentro dos padrões de interoperabilidade. A WECA nomeou a nova tecnologia de Wi-Fi.

O padrão IEEE 802.11 estabelece normas para a criação e uso de redes sem fio. A transmissão deste tipo de rede é feita por sinais de radiofrequência, que se propagam pelo ar. Como existem diversos serviços que podem utilizar sinais de rádio, é necessário que cada um opere de acordo com as exigências estabelecidas pelo governo de cada país, evitando interferências nas transmissões de diferentes serviços. As faixas Industrial, Scientific and Medical (ISM) representam intervalos de frequência que podem ser utilizados sem a necessidade da aprovação de entidades governamentais, podendo operar dentro dos seguintes intervalos de frequência: 902 MHz - 928 MHz, 2,4 GHz - 2,485 GHz e 5,15 GHz - 5,825 GHz. Dependendo do país, os intervalos de frequência das faixas ISM podem sofrer variações.

Para uma rede deste tipo ser estabelecida, é necessário que os dispositivos (stations ou STAs) se conectem a um aparelho que forneça o acesso. Ele é genericamente denominado Access Point (AP). Quando um ou mais STAs se conectam a um AP, cria-se uma rede denominada Basic Service Set (BSS). Por questões de segurança e pela possibilidade de haver mais de uma BSS em um local, é importante que cada uma receba uma identificação denominada Service Set Identifier (SSID), que representa um conjunto de caracteres inseridos no cabeçalho de cada pacote de dados da rede. O SSID pode ser considerado como o nome dado a cada rede sem fio.

2.5.1 IEEE 802.11 (Wi-Fi 0)

A primeira versão do padrão 802.11 foi lançada em 1997. Por se tratar de uma tecnologia de transmissão por radiofrequência, o IEEE determinou que o padrão operasse no intervalo de frequências entre 2,4 GHz e 2,4835 GHz, que representa um dos intervalos de frequência das faixas ISM. Sua taxa de transmissão de dados é de 1 Mb/s ou 2 Mb/s.

Para realizar a transmissão de dados por ondas de radiofrequência, são utilizadas as técnicas Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS) e Frequency-hopping Spread Spectrum (FHSS). Essas técnicas transmitem os quadros de dados enviando-os por vários canais disponíveis dentro de uma determinada frequência, ao invés de usar um único canal, possibilitando, dessa forma, a transmissão simultânea de vários quadros. A técnica DSSS distribui o sinal a ser transmitido em uma faixa de frequência e reorganiza os pacotes no receptor. A técnica FHSS, por sua vez, utiliza um esquema de "salto de frequência", onde a informação transmitida utiliza uma determinada frequência em certo período e, no outro, utiliza outra. Esta característica faz com que o FHSS tenha uma velocidade de transmissão de dados menor, mas ao mesmo tempo torna a transmissão menos suscetível a possíveis interferências, uma vez que ocorre variações na frequência utilizada. O DSSS alcança taxas de transmissão maiores, mas tem maiores chances de sofrer interferências, por fazer uso de todos os canais disponíveis ao mesmo tempo.

2.5.2 IEEE 802.11b (Wi-Fi 1)

A principal característica deste padrão é a possibilidade de estabelecer conexões nas seguintes taxas de transmissão: 1 Mb/s, 2 Mb/s, 5,5 Mb/s e 11 Mb/s. O intervalo de frequências permanece sendo o mesmo utilizado pelo padrão anterior, que é entre 2,4 GHz e 2,4835 GHz.

A técnica de transmissão utilizada se limita ao DSSS, devido a FHSS não atender às normas estabelecidas pela Federal Communications Commission (FCC) quando utilizada em transmissões com taxas superiores a 2 Mb/s. Para trabalhar de maneira efetiva com as velocidades de 5,5 Mb/s e 11 Mb/s, o padrão 802.11b também utiliza uma técnica chamada Complementary Code Keying (CCK).

O padrão DSSS 802.11 original especifica um chip de 11 bits, denominado de sequência de Barker, utilizado para codificar todos os dados enviados sobre o canal. Cada sequência de dados representa um chip de dados simples (1 ou 0), que é convertido em uma forma de onda denominada de símbolo, que pode ser enviada pelo canal. A técnica CCK foi adotada para complementar o código de Barker em redes digitais sem fio com o objetivo de atingir taxas de dados superiores a 2 Mb/s. Isso se deve à sequência de chipping mais curta do CCK, que ao invés de 11 bits, utiliza apenas 8 bits. Através do CCK é possível alcançar uma maior taxa de dados à custa de distâncias mais curtas.

2.5.3 IEEE 802.11a (Wi-Fi 2)

Com a necessidade de se alcançar taxas de transmissão mais altas, definiu-se o padrão IEEE 802.11a, que utiliza a faixa de frequência de 5 GHz ao invés da faixa de 2,4 GHz. Sua principal característica é a possibilidade de operar com taxas de transmissão de dados nos seguintes valores: 6 Mb/s, 9 Mb/s, 12 Mb/s, 18 Mb/s, 24 Mb/s, 36 Mb/s, 48 Mb/s e 54 Mb/s.

A introdução da banda de 5 GHz teve um impacto positivo em termos de interferência, por disponibilizar 12 canais de 20 MHz sem sobreposição. Com níveis de interferência menores é possível que modulações mais robustas sejam utilizadas, o que possibilita uma taxa de transmissão maior. Outra vantagem é que o 802.11a permite um total de 8 canais simultâneos, contra apenas 3 canais no padrão 802.11b. Isso proporciona que mais pontos de acesso sejam utilizados no mesmo ambiente, sem que haja perda de desempenho. Apesar das vantagens, as frequências incluídas na banda de 5 GHz sofrem uma maior atenuação, resultando em um alcance menor se comparado às frequências da banda de 2,4 GHz.

O padrão IEEE 802.11a utiliza a técnica de modulação Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM), que surgiu como uma evolução da técnica de multiplexação por divisão em frequência (FDM), onde no lugar de se utilizar banda de guarda para a separação das subportadoras na recepção do sinal, trabalha-se com uma sobreposição espectral de subportadoras. Na técnica OFDM as subportadoras se sobrepõem mas são escolhidas sub portadoras ortogonais, ou seja, mantêm uma certa relação de modo que não haja interferência entre elas.

2.5.4 IEEE 802.11g (Wi-Fi 3)

O padrão 802.11g surgiu como uma evolução do padrão 802.11b, além de utilizar outras características positivas do padrão 802.11a. O IEEE 802.11g é compatível com o 802.11b, mesmo o 802.11b não sendo capaz de receber os sinais OFDM. Para se comunicar com estações 802.11b, os equipamentos 802.11g reduzem a taxa de transmissão e ambos utilizam a mesma modulação para permitir a comunicação. A técnica de transmissão utilizada nesta versão também é o OFDM, mas quando é feita uma comunicação com um dispositivo 802.11b, a técnica de transmissão passa a ser o DSSS. O 802.11g trabalha com taxas de transmissão de até 54 Mb/s, assim como acontece com o 802.11a. Mas ao contrário desta versão, o 802.11g opera com frequências na faixa de 2,4 GHz.

2.5.5 IEEE 802.11n (Wi-Fi 4)

O IEEE 802.11n é um padrão da rede sem fio que utiliza múltiplas antenas para aumentar a transmissão de dados, através do uso de um esquema denominado Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), que aumenta as taxas de transferência de dados através da combinação de

antenas. O objetivo é aumentar a capacidade de transmissão de dados em relação aos dois padrões anteriores (802.11a e 802.11g).

A tecnologia MIMO utiliza múltiplas antenas para transmitir uma maior quantidade de informações. A técnica descrita faz uso da tecnologia Spatial Division Multiplexing (SDM), onde múltiplos fluxos de dados espaciais independentes são transmitidos, simultaneamente, em um canal espectral. A tecnologia MIMO SDM permite aumentar, significativamente, a taxa de transmissão através da utilização de fluxos de dados espaciais separados, no entanto, cada fluxo espacial requer uma antena no transmissor e no receptor.

Devido a tecnologia MIMO, houve um aumento na taxa de transferência máxima de dados de 54 Mb/s para 600 Mb/s. O padrão 802.11n pode ser usado em duas bandas de frequência: 2,4 GHz ou 5 GHz. Ao se utilizar quatro antenas, a velocidade do padrão 802.11n pode atingir até 288 Mb/s no modo de 20 MHz. Já no modo de 40 MHz, é possível atingir taxas de 600 Mb/s através da utilização da mesma quantidade de antenas. No padrão descrito, a técnica apresentada pode ser utilizada para transmitir fluxos espaciais para apenas um usuário por vez, sendo denominada de SU-MIMO (Single-User MIMO).

2.5.6 IEEE 802.11ac (Wi-Fi 5)

O 802.11ac foi introduzido no mercado com o objetivo de lidar com uma quantidade maior de dispositivos que precisam utilizar uma rede sem fio com maiores taxas de transmissão. A geração descrita possui dois padrões desenvolvidos, denominados 802.11ac Wave 1 e 802.11ac Wave 2. O segundo padrão surgiu como uma evolução do primeiro, utilizando canais de 20 MHz, 40 MHz, 80 MHz e 160 MHz de largura de banda na faixa de frequência de 5 GHz, enquanto o primeiro padrão suporta apenas canais de 20 MHz e 40 MHz, utilizando a mesma faixa de frequência. Os padrões da quinta geração são compatíveis com o padrão 802.11n e, portanto, com o padrão 802.11a. A utilização da faixa de 5GHz foi necessária devido ao fato da banda de frequência de 2,4 GHz não possuir uma largura de banda capaz de suportar o padrão 802.11ac.

O padrão 802.11ac Wave 1 utiliza a técnica de modulação SU-MIMO, possuindo a capacidade de alcançar taxas de 6,9 Gbps. O padrão 802.11ac Wave 2 introduziu a técnica MU-MIMO (Multi-User MIMO). Esta é uma tecnologia multiusuário que permite que uma estação base transmita dados simultaneamente para até 4 usuários. Isso diminui o tempo de espera de cada equipamento para iniciar a comunicação, o que torna a rede mais eficiente. O padrão 802.11ac possibilita taxas de transmissão de até 6,9 Gbps.

2.5.7 IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6)

Diferentemente das versões anteriores, o Wi-Fi 6 não traz a proposta de aumentar significativamente a velocidade de um único cliente. A principal proposta do Wi-Fi 6 é melhorar o

desempenho da rede em cenários nos quais há uma quantidade grande de usuários como estádios, aeroportos, centro de eventos, etc.

O padrão 802.11ax herda os recursos presentes na geração anterior e acrescenta novos recursos para cenários de implantação de alta densidade. No padrão anterior, a técnica OFDM era utilizada para realizar a transmissão de dados. Na técnica em questão, durante cada segmento de tempo, um usuário ocupa todas as subportadoras e envia um pacote de dados completo. O 802.11ax introduz um modo de transmissão de dados mais eficiente denominado Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA), que permite que os usuários reutilizem recursos dos canais disponíveis alocando subportadoras para diferentes usuários e adicionando múltiplos acessos ao sistema OFDM. Além disso, introduz um novo mecanismo de identificação de transmissão chamado coloração BSS, no qual um campo de cor BSS é adicionado ao cabeçalho do pacote para identificar os dados provenientes de diferentes BSSs. Dentre diversos outros recursos adicionais, o 802.11ax adiciona a tecnologia MU-MIMO para o sentido de uplink.

2.6 Conectividade IoT

Os principais requisitos técnicos na transição para a conectividade IoT são cobertura, eficiência energética e taxa de dados. Nenhuma tecnologia atende a todos esses requisitos de forma ideal. Alguns dispositivos precisam cobrir apenas determinadas áreas, enquanto outros precisam de ampla cobertura de área para realização de implantações em áreas rurais ou remotas. As tecnologias de redes celulares e Wi-Fi são capazes de suportar altas taxas de dados com grande largura de banda, através de modulações adaptativas, mas a energia consumida é elevada ou possuem um alcance reduzido (AHMAD *et al.*, 2019). No Quadro 4 é feita uma comparação entre diferentes tecnologias que podem ser aplicadas no cenário de IoT.

Quadro 4 – Requisitos técnicos das tecnologias de comunicação para IoT

Tecnologia	Consumo de energia	Taxa de transmissão	Área de cobertura
Wi-Fi	Alto	Alta	Pequena
ZigBee	Alto	Alta	Pequena
Sigfox	Baixo	Baixa	Grande
LoRa (rede pública)	Baixo	Baixa	Grande
LoRa (rede privada)	Baixo	Baixa	Grande
NB-IoT	Baixo	Baixa	Grande
2G, 3G e 4G	Alto	Alta	Grande

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos requisitos econômicos e técnicos, é importante que a tecnologia escolhida possibilite uma maior vida útil e escalabilidade a rede sem fio. A longa vida útil de uma tecnologia é uma consideração fundamental para aplicações IoT com desafios logísticos e de custo associados à substituição de dispositivos implantados. Compreender os objetivos que a rede precisa cumprir pode ajudar a entender qual tecnologia atende mais satisfatoriamente a

um determinado cenário. No Quadro 5 é feita uma comparação entre diferentes tecnologias que podem ser aplicadas no cenário de IoT.

Quadro 5 – Requisitos de expansão das tecnologias de comunicação para IoT

Tecnologia	Segurança e QoS	Escalabilidade	Custo
Wi-Fi	Alta	Baixa	Baixo
ZigBee	Alta	Baixa	Baixo
Sigfox	Baixa	Alta	Baixo
LoRa (rede pública)	Baixa	Alta	Baixo
LoRa (rede privada)	Alta	Baixa	Baixo
NB-IoT	Alta	Alta	Alto
2G, 3G e 4G	Alta	Alta	Alto

Fonte: Elaborado pelo autor.

2.7 Revisão Bibliográfica

Estudos que possuem como objetivo otimizar o processo de gerenciamento de RSUs são realizados a algum tempo. Atualmente, existem trabalhos que visam classificar diferentes tipos de materiais através da utilização de sensores capazes de identificá-los a partir de diferentes abordagens. A seguir são apresentados trabalhos cujo foco se assemelha ao deste trabalho.

Uma lixeira inteligente capaz de identificar e classificar RSUs de forma automática foi desenvolvida por Nunes (2018). No trabalho descrito foram analisadas as características mecânicas, térmicas, ópticas, elétricas e magnéticas dos RSUs. Para realizar a identificação dos materiais, dando início ao sistema de classificação, foi utilizado o sensor infravermelho, que apresentou limitações em seu funcionamento quando exposto à luz solar. Após a realização de testes para escolha dos sensores utilizados para classificação dos materiais, foi constatado que as propriedades elétricas e magnéticas seriam as mais adequadas para a classificação dos diferentes tipos de materiais, pois tais propriedades podem ser exploradas pelos sensores indutivos e capacitivos. No desenvolvimento do protótipo foram utilizados um sensor infravermelho, um sensor indutivo e três sensores capacitivos, com diferentes calibrações para cada sensor capacitivo. O sistema desenvolvido possibilita a identificação de quatro tipos de materiais: metais, orgânicos, vidros e papéis. Caso os sensores não identifiquem o tipo de material posicionado pelo usuário, o sistema considera o material como plástico.

O artigo apresentado por Singh *et al.* (2019) propõe um sistema de separação automática de resíduos através do desenvolvimento de uma lixeira inteligente capaz de classificar lixos secos e úmidos, os armazenando em dois compartimentos distintos. Diferentes tipos de materiais foram analisados de acordo com o nível de umidade detectado pelo sistema desenvolvido. O sistema consiste em três unidades: unidade de ativação, unidade de separação e unidade de distribuição. A unidade de ativação inclui o sensor infravermelho, que é inserido em cada um dos dois compartimentos e detecta a presença de objetos, ativando as unidades subsequentes e

minimizando o consumo de energia do sistema. A unidade de separação é composta pelo sensor de umidade e sensor de chuva, responsáveis por diferenciar o lixo em seco ou molhado, de acordo com as informações coletadas pelos sensores. A unidade de distribuição é responsável por depositar os resíduos nos compartimentos correspondentes, sendo composta por um motor DC (Direct Current) e servo motor. Caso o resíduo seja indentificado como seco, o servo motor deposita no compartimento de lixo seco. Já no cenário em que o resíduo esteja úmido, o motor DC é acionado com o objetivo de rotacionar a haste para a posição correta, após isso, o servo motor é ativado para que o lixo seja depositado, retornando o sistema para o seu estado original.

O modelo desenvolvido por Sharanya *et al.* (2017) propõe um sistema de gerenciamento de resíduos capaz de classificar materiais em quatro tipos distintos: metal, resíduo úmido, papel e plástico. Após o sensor infravermelho detectar um objeto, o primeiro sensor acionado é o sensor de umidade, que identifica se o lixo está seco ou molhado. Caso o lixo esteja seco, o próximo sensor de classificação do objeto em questão é o sensor indutivo, que identifica se o lixo consiste em um metal. O próximo sensor de verificação para caso o objeto não se encaixe nas possibilidades anteriores é o módulo LDR. Quando o laser penetra o objeto, o sensor envia um sinal para o microcontrolador com o objetivo de verificar a intensidade da luz recebida pelo LDR. Caso a intensidade seja máxima, o objeto é identificado como plástico e é depositado no compartimento respectivo. Caso a intensidade esteja reduzida, o objeto é identificado como papel. O motor DC presente no sistema é responsável por rotacionar o disco onde os sensores estão posicionados, permitindo que cada sensor execute a sua função. O servo motor é responsável por depositar o objeto no recipiente correto. Através da realização de testes, foi obtida uma taxa de acerto de 98% na identificação de resíduos orgânicos, 57,5% na identificação de papéis e de 42% na identificação de plásticos.

Lopes e Machado (2019) desenvolveram um sistema de gerenciamento de resíduos capaz de classificar resíduos metálicos, úmidos e secos. A princípio, os resíduos são inseridos em um funil onde o sistema detecta a presença de lixo com a ajuda de um sensor ultrassônico, que é acoplado no funil por onde os resíduos devem passar. Uma vez detectada a presença de algum resíduo, o sistema de classificação é iniciado. No momento que o objeto passa pelo funil, o sensor indutivo verifica se o resíduo é metálico. No caso de ser um material metálico, o sensor envia um sinal para o Arduino indicando o tipo de material detectado. O Arduino aciona o driver do motor, que por sua vez aciona o motor. Este acionamento leva ao giro da plataforma de detecção e o objeto de metal é depositado diretamente em um recipiente de metal. Por outro lado, se o objeto não for metálico, ele é posicionado na plataforma de detecção. Após isso, os sensores capacitivos detectam o objeto com base no teor de umidade. Se o teor de umidade for superior ao limite especificado, o objeto é considerado como resíduo úmido e é jogado na lixeira respectiva. Da mesma forma, se a umidade detectada for inferior ao limite especificado, o objeto será considerado como resíduo seco e a plataforma moverá o objeto em direção à lixeira de resíduos secos. Por meio da execução de testes, foi obtida uma taxa de acerto de 88% na identificação de materiais metálicos, 86% na identificação de resíduos secos e de 85,5% na

identificação de resíduos úmidos.

Sunehra *et al.* (2021) implementaram um sistema automático de descarte capaz de segregar os resíduos em metais, resíduos úmidos, papéis e plásticos, utilizando um sensor de proximidade indutivo, sensor de chuva e módulo LDR. No primeiro momento, o resíduo é posicionado no sensor de chuva. Caso o material esteja úmido, o servo motor é ativado e o lixo é depositado na lixeira respectiva. Caso não seja identificado como úmido, o próximo sensor que realizará a classificação é o sensor de proximidade indutivo, que verificará se o material é metálico. Em caso positivo, da mesma forma, o resíduo é depositado na lixeira respectiva. Caso não seja, a próxima e última etapa é a passagem pelo módulo LDR, que a partir da intensidade de luz recebida pelo módulo, classifica o resíduo em papel ou plástico, depositando o material no compartimento correspondente.

No sistema de classificação de resíduos desenvolvido por Balu *et al.* (2020), o material a ser descartado é inserido em uma bandeja de forma que fique acima de um sensor de proximidade indutivo e de proximidade capacitivo, que são anexados abaixo da bandeja. A bandeja é anexada em dois servo motores que giram em duas direções dependendo do tipo de resíduo detectado, para que o resíduo caia no compartimento apropriado. O sistema é capaz de classificar os materiais em três tipos: metais, resíduos úmidos e secos. O sensor IR é utilizado para definir a presença de resíduos na bandeja, sendo instalados em cada compartimento para indicar se estão cheios. No momento que algum compartimento enche, uma mensagem é exibida em um display LCD (Liquid Crystal Display). A mensagem informa ao usuário qual compartimento está cheio e é exibida enquanto os compartimentos estão cheios. Durante esse tempo, mesmo que os resíduos sejam colocados na bandeja, ela não se moverá. O display LCD também é utilizado para exibir o tipo de resíduo inserido na bandeja quando os recipientes não estão cheios.

Um sistema de classificação de resíduos através de uma esteira rolante foi desenvolvido por Rafeeq *et al.* (2016). O sistema é capaz de classificar três tipos de materiais: metal, vidro e plástico. O objeto descartado é posicionado em uma esteira rolante, que é programada para rolar no sentido horário ou anti-horário. O sensor IR é responsável por identificar a presença de um objeto. Em um cenário onde o sensor indutivo é ativado, a esteira irá rolar no sentido horário, caso contrário, irá rolar no sentido anti-horário em direção ao sensor capacitivo, que classifica o resíduo entre vidro ou plástico. Caso o resíduo em questão seja composto por vidro, o rolamento da esteira é interrompido e o material é depositado no compartimento dos vidros. Se tratando de um plástico, a esteira continua girando no sentido anti-horário e o material é depositado no compartimento dos resíduos plásticos. Após a realização de testes, foi obtida uma taxa de acerto de 90% na identificação de materiais metálicos, 93% na identificação de vidros e 98% na identificação de plásticos.

2.7.1 Discussão

Os trabalhos foram avaliados de acordo com os seguintes parâmetros: sensores utilizados, arquitetura de funcionamento do sistema e tipos de resíduos que podem ser classificados por cada sistema desenvolvido. Diversos princípios de identificação de materiais foram observados a partir da revisão bibliográfica realizada. O Quadro 6 apresenta uma comparação dos sensores utilizados nas produções acadêmicas analisadas.

Quadro 6 – Sensores utilizados em trabalhos acadêmicos para classificação de resíduos

Trabalho acadêmico	Sensor IR	Sensor ultrassônico	Sensor indutivo	Sensor capacitivo	Sensor de chuva	Sensor de umidade	Laser LDR
Nunes (2018)	✓		✓	✓			
Singh <i>et al.</i> (2019)	✓				✓	✓	
Sharanya <i>et al.</i> (2017)	✓		✓			✓	✓
Lopes e Machado (2019)		✓	✓	✓			
Sunehra <i>et al.</i> (2021)			✓		✓		✓
Balu <i>et al.</i> (2020)	✓		✓	✓			
Rafeeq <i>et al.</i> (2016)	✓		✓	✓			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Por meio do Quadro 7 é possível visualizar os tipos de materiais que cada sistema é capaz de identificar.

Quadro 7 – Tipos de materiais identificáveis pelos sistemas analisados

Trabalho acadêmico	Classificação de resíduos
Nunes (2018)	Metais, orgânicos, vidros e papéis
Singh <i>et al.</i> (2019)	Secos e úmidos
Sharanya <i>et al.</i> (2017)	Metais, úmidos, papéis e plásticos
Lopes e Machado (2019)	Metais, secos e úmidos
Sunehra <i>et al.</i> (2021)	Metais, úmidos, papéis e plásticos
Balu <i>et al.</i> (2020)	Secos e úmidos
Rafeeq <i>et al.</i> (2016)	Metais, vidros e plásticos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado, o sensor infravermelho (IR) foi utilizado na maioria dos trabalhos elencados, proporcionando uma alternativa simples e de baixo custo para identificação de resíduos, apesar de possuir limitações quando exposto à luz solar. O sensor ultrassônico representa uma alternativa ao sensor infravermelho, não possuindo as limitações que o anterior possui, detectando a presença de qualquer tipo de objeto dentro de seu alcance através de ondas sonoras, independente se está exposto à luz solar ou não. O sensor indutivo é uma opção sólida na identificação de metais. Já os sensores capacitivos podem identificar diferentes tipos de materiais, de acordo com a regulação de sua sensibilidade. O sensor de chuva e de umidade são capazes de classificar resíduos entre secos ou úmidos. Caso haja uma determinada quantidade de água na superfície de detecção, há um aumento na condutividade, que diminui a resistência e resulta

em uma baixa tensão de saída e vice-versa. Apesar de serem capazes de mensurar a umidade a partir de suas superfícies de detecção, os sensores descritos são mais adequados na detecção de gotas de chuva e na medição da umidade do solo. O módulo LDR funciona em conjunto com um transmissor a laser, sendo inseridos na arquitetura em posições diretamente opostas, o que representa uma limitação em termos de construção do protótipo. Se não houver objetos posicionados entre o transmissor a laser e o módulo LDR, a intensidade da luz no módulo LDR aumenta, reduzindo a resistência e aumentando a tensão de saída analógica do LDR. Através da utilização do módulo descrito é possível classificar diferentes tipos de materiais de acordo com a intensidade da luz que é captada pelo módulo, mas apresenta limitações de acordo com o ambiente em que está inserido, sendo necessário que esteja em um local fechado onde não haja variação da intensidade de luz.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto desenvolvido consiste em um painel de classificação de resíduos composto por sensores capazes de identificar diferentes tipos de materiais, de acordo com as seguintes composições: metal, orgânico, vidro, papel e plástico.

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos utilizados no desenvolvimento do protótipo. Inicialmente será realizada a descrição das etapas de desenvolvimento deste trabalho. Em seguida, a arquitetura do sistema proposto e seus componentes serão apresentados. Por fim, será explicado o princípio de funcionamento do sistema de classificação desenvolvido, além dos custos relacionados ao desenvolvimento do protótipo.

3.1 Etapas de Desenvolvimento

A primeira etapa consistiu em analisar e definir o público alvo do protótipo, para que o seu desenvolvimento possuísse um enfoque maior na resolução de problemas encontrados no descarte e na disposição final dos resíduos sólidos gerados pela população. Com a definição dos resíduos mais descartados pelo público alvo, foram analisadas quais características dos materiais poderiam ser abordadas, visando encontrar sensores no mercado que fossem capazes de detectar tais materiais satisfatoriamente. Após a obtenção dos sensores, foram realizados testes de verificação com o intuito de obter um maior entendimento sobre o funcionamento dos sensores adquiridos. Em seguida, foi definida a arquitetura do hardware, através da escolha de componentes que fossem capazes de concretizar o objetivo do trabalho satisfatoriamente. Logo após, foi realizada a programação do sistema de identificação. Por fim, foi desenvolvida a estrutura do protótipo, além da implantação de mecanismos que adicionassem recursos ao sistema, como a identificação do peso dos resíduos descartados pelo usuário e a abertura da tampa da lixeira específica, de acordo com o material identificado pelo sistema. As subseções seguintes detalham com maior profundidade as etapas descritas.

3.2 Definição do Público Alvo

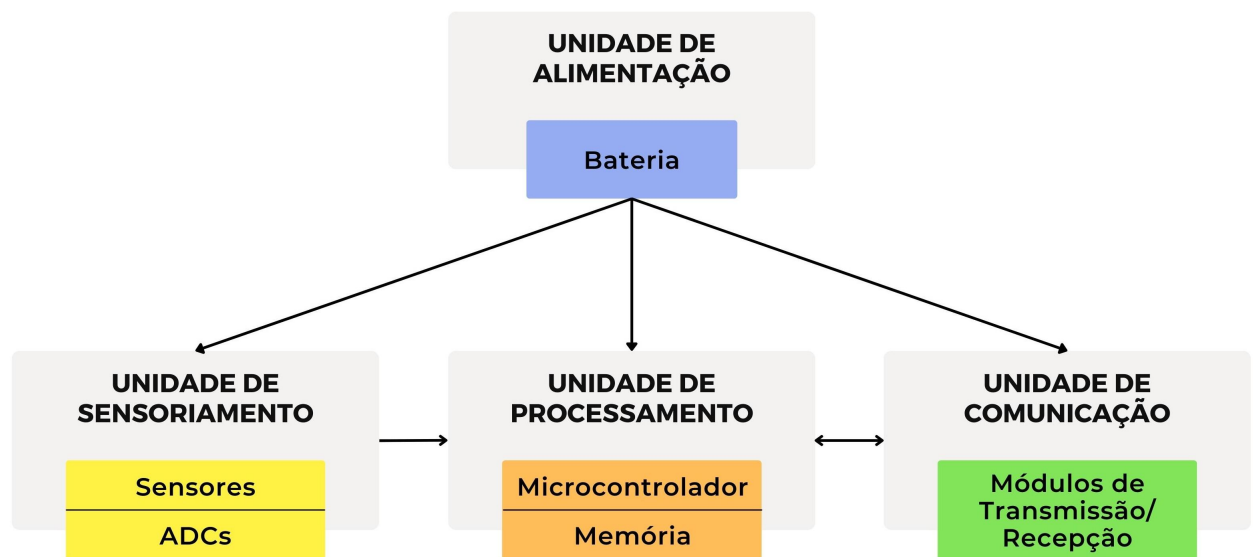
Ao analisar o comportamento dos cidadãos, foi observado que em locais públicos, como mercados, praças, parques, praias, áreas comerciais, entre outros, muitas pessoas descartam os resíduos incorretamente, como aponta os dados apresentados em ABRELPE (2021), que demonstram que milhares de toneladas de lixo ficam à céu aberto no Brasil, sem o devido tratamento dos resíduos. A reciclagem, que permite o reaproveitamento de diversos tipos de materiais, não é possível devido a falta de lixeiras seletivas em muitos dos locais descritos, desperdiçando a oportunidade de reciclagem desses materiais.

O protótipo desenvolvido tem como público alvo os indivíduos que utilizam espaços com grande circulação de pessoas, buscando facilitar e otimizar o processo de gerenciamento de RSUs, reduzindo o desperdício de materiais e motivando os cidadãos a contribuir com a preservação dos ambientes abordados.

3.3 Componentes de um Nó Sensor

Os quatro elementos básicos de um nó sensor são apresentados na Figura 8. Posteriormente, será analisado cada componente descrito.

Figura 8 – Componentes de um nó sensor



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1 Unidade de Energia

Com o objetivo de garantir flexibilidade aos nós, comumente se emprega o uso de baterias, dessa forma, o sensor pode ser deslocado sem a necessidade de criar meios de alimentá-lo. Devido ao fator da locomoção, tem-se interesse no uso de componentes e rotinas de baixo consumo para aumentar o tempo funcional do sensor. A vida útil do nó sensor está diretamente relacionada com o uso de energia do nó e a eficiência energética da fonte de alimentação (OGBITI *et al.*, 2016).

Por serem capazes de estimar o consumo de energia dos nós sensores, aplicativos e protocolos de roteamento são capazes de tomar decisões que possam aumentar a vida útil da rede de sensores. A eficiência energética tornou-se um tema importante dentro da área de redes de sensores sem fio. O interesse pela eficiência energética é atribuído às limitações impostas pelas baterias utilizadas para alimentar tais dispositivos (ENGMANN *et al.*, 2018). O nó geralmente obtém energia de uma fonte DC, que é a opção mais utilizada no caso de redes estruturadas onde

a posição do nó sensor é fixa. Para aplicações de longa duração e em locais de difícil acesso, pode-se optar por fontes alternativas como células solares.

3.3.2 *Unidade de Sensoriamento*

É composta por duas subunidades: sensores e conversores analógico-digitais (ADC – Analog-to-Digital Converter). A função da unidade de sensoriamento é detectar e regular o sinal de carga elétrica proveniente dos sensores em um sinal de tensão que pode ser amostrado por um conversor analógico-digital (AD) no microcontrolador (CHEN *et al.*, 2018). Através dos sensores é possível detectar fenômenos dentro da área de interesse. O conversor analógico-digital é responsável por transformar um sinal analógico, contínuo no tempo, em um sinal amostrado, discreto no tempo. O processo resume-se em converter um sinal físico em um sinal que pode ser quantificado digitalmente de modo a ser processado pela unidade computacional.

Os sensores podem ser divididos em sensores digitais e sensores analógicos. O sinal analógico emitido pelo sensor analógico é preciso ser convertido em um sinal digital através do conversor analógico-digital e enviado ao processador (ZHANG; WANG, 2021). O sensor digital pode emitir diretamente o sinal digital, sem a necessidade da utilização do conversor analógico-digital, o que é mais conveniente.

3.3.3 *Unidade de Computação*

É responsável por realizar o processamento dos dados que serão transferidos para a unidade de comunicação. A memória e o microcontrolador estão envolvidos nas atividades de computação realizadas pelo nó. Quanto maior a frequência do processador, maior o consumo de energia. A unidade de processamento é o elemento central de um nó que determina seus recursos computacionais e desempenho. A unidade referida executa várias funções, como, por exemplo, converter sinais analógicos em digitais, controlar a interação e sincronização entre os sensores, agregar e processar dados (AGARKHED; DATTATRAYA; PATIL, 2020). O processamento do nó pode ser medido através do número de ciclos de relógio que necessita para realizar diferentes tarefas como o processamento de sinais e verificação de código de erro (SILVA *et al.*, 2011).

3.3.4 *Unidade de Comunicação*

Unidade responsável pela transmissão, recepção, amplificação e geração de sinais. É composta pelo sistema de transmissão de dados, amplificador e antena, no caso de transmissão por rádio. Usualmente, os nós sensores utilizam antenas omnidirecionais para realizar a comunicação sem fio devido a uma variedade de razões, incluindo seu pequeno tamanho, baixo custo, facilidade de implantação e protocolos simplificados relacionados à transmissão (CURIAC, 2016).

3.4 Hardware

Para o desenvolvimento do sistema foi utilizada a placa Arduino Mega 2560. Arduino é uma plataforma eletrônica de prototipagem que fornece recursos para o desenvolvimento de aplicações, possuindo grande compatibilidade com diversos tipos de sensores e atuadores. Uma de suas facilidades é o acesso ao microcontrolador, que já vem integrado à placa e possui uma estrutura simplificada para a montagem de circuitos.

O Arduino foi desenvolvido com base no conceito open-source, o que permite que o firmware possa ser utilizado livremente por outros desenvolvedores e fabricantes, possuindo uma linguagem de programação própria, que é um subconjunto da linguagem C++. Foi nessa linguagem que foi implementado o software do sistema desenvolvido.

Os principais componentes presentes no sistema são elencados a seguir.

3.4.1 Arduino Mega 2560

O microcontrolador do Arduino Mega 2560 possui 54 pinos de entrada/saída digital, onde 15 pinos podem ser utilizados para saída PWM, 16 pinos para entradas analógicas e pinos para UARTs. Possui um oscilador de cristal de 16 MHz, conexão USB, alimentação jack, cabeçalho ICSP e botão de reset.

O Arduino Mega 2560 foi utilizado devido a maior quantidade de portas disponíveis para utilização dos componentes necessários.

Tabela 2 – Especificações Técnicas do Arduino Mega 2560

Especificação	Valor
Dimensões	5,3x10,2x1 cm
Microcontrolador	ATmega2560
Tensão de operação	5 V
Tensão de entrada (recomendada)	7 a 12 V
Tensão de entrada (limites)	6 a 20 V
Pinos de entrada/saída (I/O) digitais	54 (dos quais 14 podem ser saídas PWM)
Corrente DC por pino I/O	40 mA
Corrente DC para pino de 3,3V	50 mA
Memória Flash	256 kB (dos quais 8 kB são usados pelo bootloader)
Memória SRAM	8 kB
Memória EEPROM	4 kB
Velocidade do Clock	16 MHz
Peso	150 g

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.2 Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01S

O módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01S possui a capacidade de conectar projetos e sistemas na Internet por meio do chip ESP8266, presente no módulo.

O ESP-01S trabalha com as redes Wi-Fi 802.11b, 802.11g e 802.11n, realizando uma comunicação sem fio de baixa potência, operando na frequência de 2.4 GHz. O módulo possui suporte aos padrões de segurança WPA e WPA2. A comunicação com o ESP-01S pode ser feita através de qualquer microcontrolador.

Tabela 3 – Especificações Técnicas do Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01S

Especificação	Valor
Dimensões	25x14x1 mm
Chip	ESP8266
Tensão de operação	3,3 V
Suporte à redes	802.11 b/g/n
Alcance	90 m
Tipo de comunicação	Serial (TX/RX)
Protocolos de comunicação	TCP e UDP
Modo de segurança	OPEN/WEP/WPA_PSK/WPA2_PSK/WPA_WPA2_PSK
Peso	7 g

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.3 Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04

Ultrassons são ondas sonoras cujas frequências são maiores que o limite audível pelo ser humano. O ouvido humano consegue escutar até 20 kHz, enquanto as ondas ultrassônicas possuem frequências superiores aos 20 kHz.

Os sensores ultrassônicos são amplamente utilizados para medir a distância entre objetos em diferentes aplicações, como estacionamento inteligentes, na prevenção de colisões entre automóveis, navegação robótica, sistemas de segurança, medição de distância entre dois objetos etc. (SINGH; BORSCHBACH, 2017). O sensor em questão é leve e compacto, possuindo uma maior precisão e robustez em comparação a outros sensores, como os sensores infravermelhos.

O sensor ultrassônico tem como princípio de funcionamento a emissão e recepção de uma onda sonora de alta frequência. A detecção de um objeto resulta na reflexão da onda que gera um eco, posteriormente convertido em sinais elétricos. Os sensores ultrassônicos funcionam medindo o tempo de propagação do eco, isto é, o intervalo de tempo entre o impulso sonoro emitido e o eco recebido de volta. O feixe ultrassônico emitido pelo sensor tem um formato de cone, e somente objetos dentro do raio de abrangência do feixe são detectados. Os objetos a serem detectados podem ser sólidos, líquidos, granulares ou pós.

Durante o tempo de emissão e recepção do sinal, o pino ECHO permanece em nível alto.

O cálculo da distância é feito de acordo com o intervalo em que o pino ECHO está ativado, após o pino TRIGGER entrar em nível alto.

$$Distância = \frac{Tempo\ ECHO * Velocidade\ do\ Som}{2} \quad (3.1)$$

Na fórmula, a divisão por 2 se deve ao fato de que a onda percorre 2 vezes a distância entre o sensor e o objeto, sendo enviada e posteriormente rebatida.

Tabela 4 – Especificações Técnicas do Sensor de Distância Ultrassônico HC-SR04

Especificação	Valor
Dimensões	40x20x15 mm
Tensão de alimentação	5 V
Frequência de operação	40 kHz
Corrente consumida	15 mA
Distância máxima	4 m
Distância mínima	2 cm
Ângulo de medição	15°
Sinal de entrada (TRIGGER)	Pulso TTL (5 V) de 10 us
Sinal de saída (ECHO)	Pulso TTL (5 V) proporcional à distância detectada
Peso	5 g

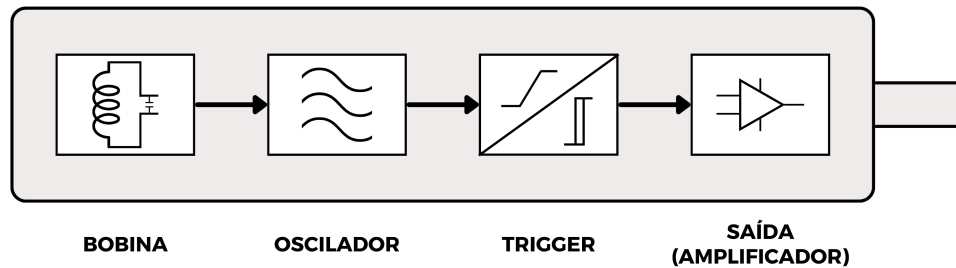
Fonte: Elaborada pelo autor.

No presente trabalho, o sensor de distância ultrassônico é responsável por detectar a presença de materiais posicionados em sua face, dando início à etapa de classificação do material.

3.4.4 Sensor de Proximidade Indutivo

Os sensores de proximidade indutivos são dispositivos que emitem um campo eletromagnético gerado por uma bobina presente no circuito oscilador e emitido à face do sensor. O sensor descrito é composto por um circuito oscilador LC, um comparador de sinal e um chaveador (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011). Algumas especificações importantes para o sensor de proximidade indutivo incluem: distância sensora, repetibilidade, campo ajustável e distância mínima do alvo.

O circuito oscilador LC induz um campo eletromagnético que possui uma intensidade determinada por valores de indutância, capacitância e frequência (HAGAN, 2017). Qualquer objeto que está nas proximidades do sensor irá alterar os parâmetros eletromagnéticos de acordo com a distância entre o objeto e o sensor. O trigger converte a informação em um sinal definido que segue para o amplificador, gerando o sinal de saída do sensor. Um diagrama de blocos do sensor referido é apresentado na Figura 9.

Figura 9 – Diagrama de blocos do sensor de proximidade indutivo

Fonte: Adaptada de (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

O sensor indutivo possui a capacidade de detectar metais, que são materiais capazes de interagir com o seu campo eletromagnético. O sensor utilizado foi o LJ12A3-4-Z/BX. Na tabela 5 são apresentadas algumas especificações técnicas do sensor em questão.

Tabela 5 – Especificações Técnicas do Sensor Indutivo LJ12A3-4-Z/BX

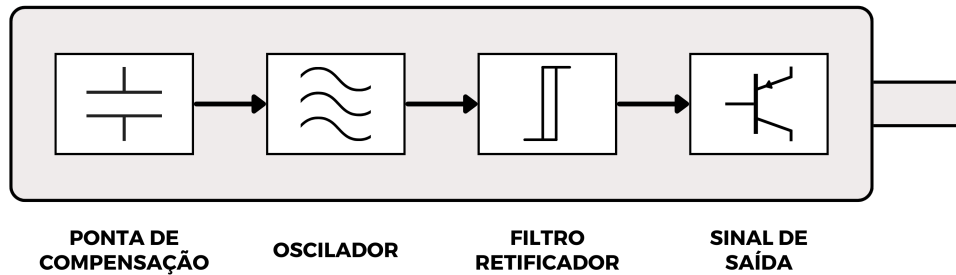
Especificação	Valor
Tensão de operação	6 a 36 VDC
Corrente de saída	300 mA
Polaridade	NPN
Distância de detecção	4 mm
Estado da saída	NA (normalmente aberto)
Comprimento do cabo	110 cm
Comprimento do sensor	65 mm
Peso	40 g

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.5 Sensor de Proximidade Capacitivo

Os sensores capacitivos são projetados para gerar um campo eletrostático, detectando a presença de objetos dentro de sua zona de detecção, de acordo com a alteração de sua capacitância. Os componentes presentes no sensor são: oscilador, retificador de sinal, um circuito de filtragem, circuito de saída e ponta capacitiva (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

No cenário onde não existe nenhum objeto próximo do sensor, o oscilador está inativo. Quando o objeto se aproxima, ocorre um aumento na capacitância do circuito devido a ponta capacitiva. Ao atingir um determinado valor, o oscilador é ativado. Esta ativação gera um sinal que passa pelo trigger, que realiza a transformação do sinal para uma onda quadrada. A onda quadrada estimula o comutador, que realiza o chaveamento e permite que o sinal passe, ou não, para a placa controladora (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

Figura 10 – Diagrama de blocos do sensor de proximidade capacitivo

Fonte: Adaptada de (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011).

A capacitância detectada pela ponta de compensação varia de acordo com o tamanho do alvo, constante dielétrica e distância até a ponta.

O valor da capacitância (C) pode ser calculada de acordo com a seguinte equação, segundo Callister e Rethwisch (2016):

$$C = \varepsilon \frac{A}{l} \quad (3.2)$$

O símbolo ε se refere a permissividade do material dielétrico, (A) representa a área do material e (l) a distância do material até a ponta capacitiva. O aumento na capacitância ocorre em função do aumento do tamanho do alvo, aumento da constante dielétrica e diminuição da distância até a ponta de compensação.

A permissividade, também denominada de constante dielétrica, é determinada através da capacidade de um material se polarizar em resposta a um campo elétrico aplicado e, dessa forma, cancelar parcialmente o campo no interior do material. De acordo com a equação apresentada previamente, é possível inferir que a capacitância é diretamente proporcional a permissividade do material e a área, enquanto é inversamente proporcional à distância.

Os sensores capacitivos utilizados no projeto foram do tipo LJC18A3-B-Z/BX. Ao todo foram utilizados quatro sensores capacitivos, cada um responsável por identificar diferentes tipos de materiais. O sensor descrito possui um led que indica a ativação do oscilador e um regulador que ajusta a sensibilidade da ponta capacitiva, fazendo com que o sensor identifique materiais com determinados valores de permissividade. Assim, pode-se ajustar o sensor para detectar os materiais desejados.

Tabela 6 – Especificações Técnicas do Sensor Capacitivo LJC18A3-B-Z/BX

Especificação	Valor
Tensão de operação	6 a 36 VDC
Corrente de saída	300 mA
Polaridade	NPN
Distância de detecção	10 mm
Estado da saída	NA (normalmente aberto)
Comprimento do cabo	120 cm
Comprimento do sensor	70 mm
Peso	85 g

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.6 Micro Servo Motor

A distinção entre o servo motor e os outros motores de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) é que os servos motores possuem um encoder e um controlador acoplados. O servo motor é um atuador rotativo ou linear que garante o controle, velocidade e precisão em aplicações de controle de posição. Além disso, é projetado com um diâmetro reduzido e longo comprimento de rotação, se diferenciando dos motores convencionais, permitindo sua utilização em aplicações de posicionamento. No servo motor CC, a velocidade varia com base na tensão aplicada, enquanto no servo motor CA a velocidade é determinada pela frequência da tensão e é ajustada através de um variador de frequência.

Os servo motores CA podem ser utilizados em tecnologias de transporte, impressão, processamento de madeira, indústria têxtil, indústria de plásticos, indústria de embalagens e indústria de alimentos (ALI; RAZAK; HAYIMA, 2020). Já os servo motores CC têm sido utilizados em computadores, máquinas de controle numérico, equipamentos industriais, indústria de armas, controle de velocidade de alternadores e robôs (ELSAYED *et al.*, 2014).

No projeto foram utilizados cinco micro servo motores, posicionados no interior de cada lixeira. Quatro dos servo motores utilizados foram do modelo Hextonik HXT900 e um do modelo Turnigy TG9e. Nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas as especificações técnicas dos micro servo motores utilizados no projeto.

Tabela 7 – Especificações Técnicas do Micro Servo Hextonik HXT900

Especificação	Valor
Dimensões	22x12x21 mm
Tensão de operação	3 a 6 V
Torque	1,6 kg/cm
Velocidade	0,12 sec/60°
Comprimento do cabo	25 cm
Peso	9,8 g

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Especificações Técnicas do Micro Servo Turnigy TG9e

Especificação	Valor
Dimensões	23x12,2x29 mm
Tensão de operação	4,8 a 6 V
Torque	1,5 kg/cm
Velocidade	0,1 sec/60°
Comprimento do cabo	26 cm
Peso	10 g

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.7 Módulo Conversor HX711

O módulo conversor analógico/digital HX711 foi projetado para proporcionar a conversão de valores de resistência de sensores em dados digitais, sendo utilizado em balanças e aplicações de controle industrial, realizando a comunicação direta com células de carga. Essa conversão é possível através de um circuito AD de 24 bits presente no módulo. Os sensores de peso existentes em balanças não possuem precisão em seus dados, por isso se faz necessário o uso de um módulo desenvolvido especificamente para uso com sensores de peso. O regulador de alimentação presente no chip elimina a necessidade de uma alimentação externa que forneça alimentação analógica para o ADC e o sensor.

Para cada célula de carga foi utilizado um módulo conversor HX711, totalizando cinco módulos. As especificações técnicas do módulo descrito são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Especificações Técnicas do Módulo HX711

Especificação	Valor
Dimensões	34x21x2 mm
Tensão de operação	2,6 a 5,5 V
Corrente de funcionamento	< 10 mA
Diferencial de tensão de entrada	± 40 mV
Precisão dos dados	24 bits
Frequência de atualização	80 Hz
Peso	2,5 g

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.8 Célula de Carga

As células de carga podem ser utilizadas em conjunto com microcontroladores no sensoramento de cargas que estejam sobre sua meia-ponte. A resistência da meia-ponte é alterada de acordo com o peso a ela aplicado. O sensor envia ao microcontrolador uma pequena tensão que será interpretada, determinando o peso. Estas pequenas mudanças podem ser medidas pelos strain gages (SG), que são condutores elétricos firmemente fixos. Os SG são alongados

ou encurtados de acordo com o peso do material, fazendo com que a resistência dos condutores elétricos varie. A micro deformação pode ser determinada desta forma, com a resistência aumentando de acordo com a deformação e diminuindo quando ocorre a contração.

No presente trabalho foram utilizadas cinco células de carga. As especificações técnicas são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Especificações Técnicas da Célula de Carga de 10 kg

Especificação	Valor
Dimensões	80x12,7x12,7 mm
Carga nominal	10 kg
Tensão de funcionamento recomendada	3 a 12 VDC
Tensão máxima de operação	15 VDC
Material	Liga de alumínio
Peso	31 g
Ligação dos fios	Vermelho (+), preto (-), verde (sinal +), branco (sinal -)

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.9 Display LCD 16x2

A tela LCD descrita é um módulo de display eletrônico. O módulo é preferível ao display de sete segmentos e outros LEDs de vários segmentos devido ao seu baixo custo e facilidade de programação. Ele pode exibir 16 caracteres por linha. O registrador de dados do LCD armazena os dados a serem exibidos. Os dados são representados através de caracteres ASCII, que são exibidos no display.

Existem muitas combinações disponíveis como 8x1, 8x2, 10x2, 16x1 etc., mas a mais usada é o LCD 16x2. Assim, o display LCD terá 32 caracteres no total e cada caractere será composto por 5x8 pixels. Considerando que cada caractere possui 40 pixels e o display possui 32 caracteres, temos 1280 pixels.

O display LCD 16x2 adicionado ao projeto é responsável por fornecer informações ao usuário, tais como o tipo e o peso dos materiais descartados. Suas especificações técnicas são apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Especificações Técnicas do Display LCD 16x2

Especificação	Valor
Dimensões	80x36x12 mm
Tensão de operação	4,5 a 5,5 V
Corrente de operação	1 a 1,5 mA (luz de fundo desligada)
Corrente da luz de fundo	75 a 200 mA
Dimensão da área visível	64,5x14 mm
Dimensão caractere	3x5,02 mm
Dimensão ponto	0,52x0,54 mm

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Constante Dielétrica

A propriedade da permissividade pode ser analisada com o objetivo de diferenciar materiais, onde a permissividade varia de acordo com a composição do material. O desempenho do sensor de proximidade capacitivo é severamente influenciado pela natureza física do material detectado, como por exemplo: ferro, pele, plástico e vidro (CHIURAZZI *et al.*, 2020). Portanto, a resposta do sensor precisa ser calibrada e adaptada ao material específico. Na Tabela 12 é apresentada a constante dielétrica de diferentes tipos de materiais.

Tabela 12 – Constante dielétrica de alguns materiais

Material	Constante dielétrica (ϵ)
Vácuo	1
Ar (1 atm)	1,00054
Água 20°C	80,4
Água 25°C	78,5
Papel	3,5
Vidro Pirex	4,7

Fonte: Adaptada de Halliday, Resnick e Walker (2016).

3.5.1 Plásticos Polares e Apolares

Os plásticos fazem parte de um grupo pertencente a uma categoria maior de materiais chamados de polímeros. Os polímeros são macromoléculas originadas a partir da união de várias unidades de moléculas menores, chamadas de monômeros. Os monômeros se unem por meio de ligações covalentes originadas a partir de uma reação química conhecida como polimerização. Os plásticos podem ser classificados em polares ou apolares, dependendo de suas estruturas. Tais classificações determinam as propriedades elétricas pertencentes ao plástico. A seguir são apresentados conceitos relacionados aos plásticos polares e apolares, segundo informações encontradas em Omnexus (2022).

- Nos **plásticos polares**, os dipolos tendem a se alinhar na presença de um campo elétrico, devido a um desequilíbrio na distribuição de elétrons, tornando esse tipo de plástico apenas moderadamente isolante. Pode-se citar os seguintes exemplos: poli(cloreto de vinila) (PVC), nylon (poliamida) e policarbonato (PC).
- Já nos **plásticos apolares** não existem dipolos polares presentes, por não possuírem moléculas simétricas e covalentes. Na presença de um campo elétrico, os dipolos não são alinhados. No entanto, ocorre uma polarização eletrônica devido ao movimento dos elétrons na direção do campo elétrico, que é instantâneo. Esses plásticos possuem baixa

constante dielétrica e alta resistividade. São exemplos de plásticos apolares: polipropileno (PP), polietileno (PE) e poliestireno (PS).

Os plásticos polares tendem a absorver a umidade da atmosfera, aumentando os valores da constante dielétrica presente nesses materiais. Com o aumento da temperatura, há um movimento mais rápido das cadeias poliméricas e um rápido alinhamento dos dipolos, aumentando a constante dielétrica dos plásticos polares. Os plásticos apolares não são afetados pela umidade e pelo aumento da temperatura.

São fatores que influenciam a constante dielétrica: frequência, umidade, temperatura, tensão, estrutura, morfologia, presença de outros materiais no plástico e deteriorização.

As constantes dielétricas dos principais tipos de plástico são apresentadas na Tabela 13, segundo a ABNT NBR 13230:2008, que podem variar devido aos fatores descritos anteriormente.

Tabela 13 – Constante dielétrica dos principais tipos de plástico

Nº	Resinas termoplásticas	Abreviatura		Constante dielétrica (ϵ)	
		Português	Inglês	Valor mínimo	Valor máximo
1	Poli(tereftalato de etileno)	PET	PET	3,00	4,00
2	Polietileno de alta densidade	PEAD	HDPE	2,30	2,30
3	Poli(cloreto de vinila)	PVC	V	3,00	4,00
4	Polietileno de baixa densidade	PEBD	LDPE	2,30	2,30
	Polietileno de baixa densidade linear	PEBDL	LLDPE	2,30	2,30
5	Polipropileno	PP	PP	2,30	2,30
6	Poliestireno	PS	PS	2,40	2,70
7	Outras resinas	Outros	Other	-	-

Fonte: Adaptada de Omnexus (2022).

3.6 Análise dos Materiais

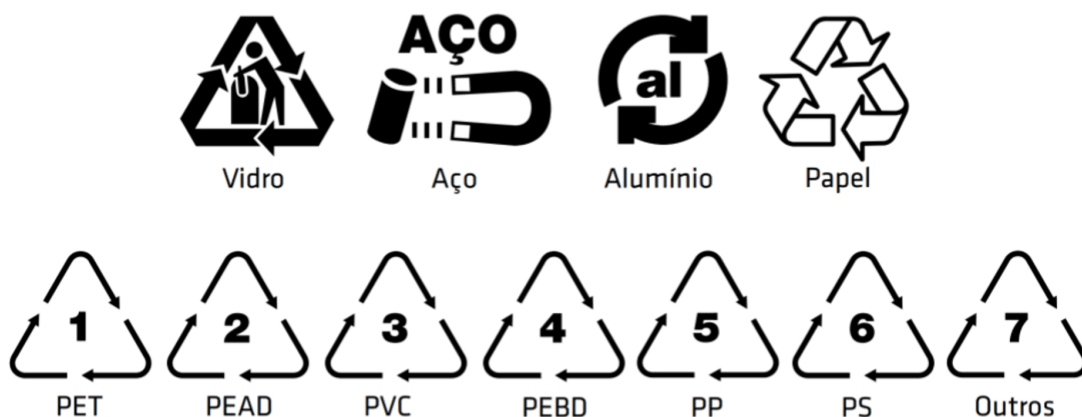
A partir do estudo dos materiais que podem ser reaproveitados, foi possível determinar quais são os tipos de sensores que melhor se encaixam no projeto. Os materiais analisados no estudo se concentram nos resíduos secos e molhados, que são descartados com frequência pelo público em geral. Os materiais investigados são: metais, resíduos orgânicos, vidros, papéis e plásticos. No Quadro 8 são listados os resíduos pertencentes a cada tipo de material, considerados dentro do cotidiano do público alvo analisado e que possam ser reaproveitados através da reciclagem ou compostagem, no caso dos orgânicos. Para cada tipo de material foram analisados quais elementos podem ser reaproveitáveis ou não.

Quadro 8 – Exemplos de resíduos reaproveitáveis e não reaproveitáveis

Tipo de Resíduo	Reaproveitáveis	Não Reaproveitáveis
Metal	- Latas de alumínio; - Latas de aço; - Tampas de garrafa; - Embalagens de comida; - Utensílios de cozinha; - Arames, pregos e parafusos; - Canos.	- Latas enferrujadas; - Clipes; - Grampos; - Latas de inseticidas; - Latas de solventes químicos; - Esponjas de aço; - Latas de Verniz.
Orgânico	- Resto de frutas, legumes, alimentos em geral.	- Não há restrições, desde que seja feito o processamento correto para compostagem.
Vidro	- Vidros planos e lisos; - Garrafas de bebida; - Frascos; - Potes de alimentos; - Pratos, copos e tigelas.	- Ampolas de medicamentos; - Vidros temperados; - Lâmpadas; - Porcelanas; - Cerâmicas.
Papel	- Jornais e revistas; - Folhas de caderno; - Papelões; - Envelopes; - Cartões e cartolinas; - Embalagens Tetra Pak.	- Papéis sanitários; - Papéis engordurados; - Fotografias; - Guardanapos; - Etiquetas adesivas; - Papéis metalizados ou plastificados.
Plástico	- Tampas; - Potes de alimentos; - Sacos; - Garrafas PET; - Frascos de produtos; - Canos e tubos de PVC; - Baldes.	- Plásticos termofixos; - Celofane; - Embalagens plásticas metalizadas; - Embalagens plásticas siliconadas; - Esponjas; - Tomadas; - Acrílicos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os símbolos de identificação atribuídos às embalagens de papel, alumínio, aço e vidro são definidos pela norma ABNT NBR 16182:2013, enquanto os símbolos correspondentes dos principais tipos de plásticos recicláveis são definidos pela norma ABNT NBR 13230:2008. A simbologia de identificação é destinada à facilitação no processo de triagem, sendo fundamental para que a logística reversa se estabeleça adequadamente (KARASKI *et al.*, 2016). Os símbolos que identificam diferentes tipos de materiais recicláveis podem ser observados na Figura 11.

Figura 11 – Simbologia de identificação de alguns tipos de materiais

Fonte: Adaptada de Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008) e Associação Brasileira de Normas Técnicas (2013).

3.7 Protótipo

3.7.1 Sistema de Classificação

Algumas propriedades dos materiais foram analisadas, tais como: térmicas, mecânicas, ópticas, elétricas e eletromagnéticas. As propriedades elétricas e eletromagnéticas demonstraram ser as mais indicadas, por possibilitarem a identificação dos tipos de resíduos que o trabalho se propõe a classificar, além da maior facilidade de se encontrar sensores de baixo custo. O aspecto físico do protótipo de identificação dos resíduos também foi levado em consideração, tendo em vista a aplicação do trabalho desenvolvido em cenários reais.

Para realizar a classificação dos materiais foram utilizados dois tipos de sensores que permitem concretizar o objetivo de classificar os tipos de resíduos alvos, que são os sensores de proximidade indutivo e capacitivo. O sensor indutivo permite a identificação de materiais metálicos através da alteração do campo eletromagnético presente no seu circuito, de acordo com a distância entre o objeto e o sensor. Já o sensor capacitivo, além de detectar objetos metálicos, pode identificar outros tipos de objetos através de sua zona de detecção, que varia de acordo com a alteração da capacitância do sensor. O sistema de classificação é composto por um sensor indutivo e quatro sensores capacitivos.

3.7.1.1 Calibração

O sensor de proximidade indutivo foi utilizado para detectar materiais metálicos, não possuindo nenhuma forma de calibrar a sua sensibilidade. A confirmação do princípio de funcionamento do sensor foi feita através de testes.

O sensor capacitivo possui um regulador localizado na parte de trás, permitindo que a sensibilidade do sensor seja regulada para detectar apenas determinados tipos de materiais. Para

realizar a calibração dos sensores foram feitos testes com diferentes tipos de resíduos, que foram posicionados na face dos sensores.

3.7.1.2 Lógica de Classificação

A lógica de classificação foi construída buscando-se uma resposta mais rápida do sistema, através de critérios a serem concretizados para realizar a classificação de cada tipo de resíduo. No momento em que o material é identificado pelo sensor ultrassônico, o usuário posiciona o material nos sensores de classificação, dentro da ordem estabelecida. Analisando o cenário onde o material analisado é metálico, que representa o momento em que o sensor indutivo é ativado, o sistema identifica o material imediatamente, para que a tampa da lixeira específica seja aberta e o usuário possa depositar o material. No Quadro 9 é demonstrado quais sensores precisam ser ativados para que o sistema reconheça cada tipo de material.

Quadro 9 – Lógica de classificação dos resíduos

	Indutivo	Capacitivo 1	Capacitivo 2	Capacitivo 3	Capacitivo 4
Metal	✓				
Orgânico		✓	✓	✓	✓
Vidro			✓	✓	✓
Papel				✓	✓
Plástico					✓

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.7.2 Estrutura do Sistema e Mecanismo de Seleção

O projeto foi desenvolvido considerando a variação de cenários possíveis, de acordo com o custo e o cenário de aplicação. Caso seja necessário apenas a classificação de materiais, o protótipo de seleção pode ser utilizado para cumprir o objetivo de classificar os resíduos.

Na prototipagem do circuito foram utilizadas duas fontes de alimentação. Para alimentar o sensor indutivo e os sensores capacitivos, foi utilizada uma fonte de 12 V com uma corrente de operação de 1,5 A. Para os demais componentes do sistema, incluindo o Arduino Mega 2560, foi utilizada uma fonte de 5 V com uma corrente de 2 A.

Para abrir a tampa da lixeira específica e calcular o peso dos resíduos depositados, foram adicionados sensores de peso e servo motores em cada lixeira. O protótipo foi idealizado de forma que fosse possível ser implementado em cenários reais com maior facilidade, tendo em vista que grande parcela das lixeiras seletivas separam os materiais dentro de uma mesma classificação: metal, orgânico, vidro, papel e plástico.

A função de cada componente pertencente ao sistema será explicada a seguir:

- **Sensor ultrassônico:** responsável por detectar resíduos posicionados em sua face, que serão classificados pelos sensores subsequentes.

• **Sensor indutivo:** utilizado para identificar materiais metálicos. Em um cenário onde o sensor é ativado, o sistema informará o tipo do material e avançará para a próxima etapa. Caso contrário, o objeto deverá ser posicionado nos sensores seguintes.

• **Sensores capacitivos:** responsáveis por identificar resíduos orgânicos, vidros, papéis e plásticos. Caso o material não seja identificado após a passagem do objeto pelos sensores de classificação, o sistema informará que o material não foi reconhecido através do display LCD.

• **Push buttons:** no momento que o material é identificado, a tampa da respectiva lixeira abre. Após a abertura da tampa, o usuário pode escolher entre fechar a tampa da lixeira ou manter aberta por mais tempo, de acordo com a quantidade de resíduos de mesmo tipo que o usuário necessite depositar.

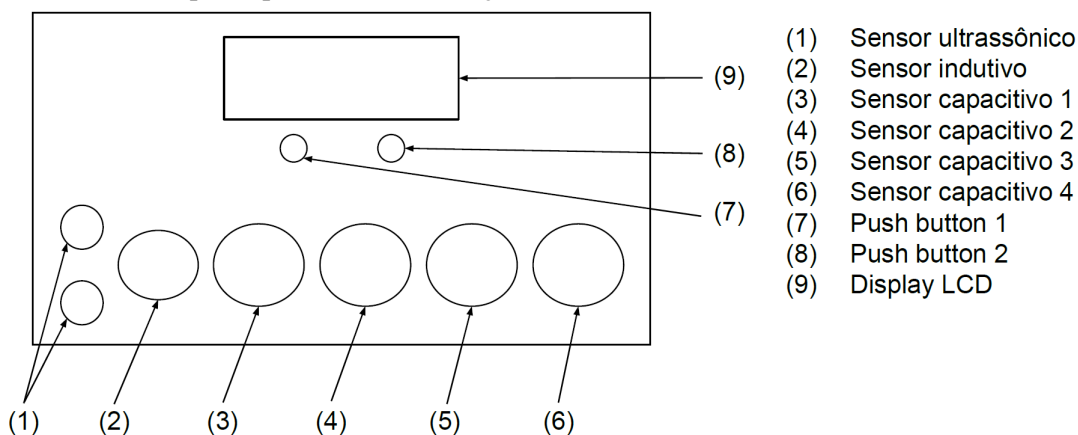
• **Display LCD:** possui a função de instruir o usuário durante a utilização do sistema. Além disso, é utilizado para informar o peso do material depositado pelo usuário.

• **Servo motores:** utilizados para abrir a tampa das lixeiras, de acordo com o tipo de material a ser descartado. Após o usuário finalizar o descarte, a tampa será fechada.

• **Sensores de peso:** responsáveis por informar qual o peso dos resíduos descartados a cada utilização do sistema. Cada célula de carga é capaz de detectar até 10 kg de materiais.

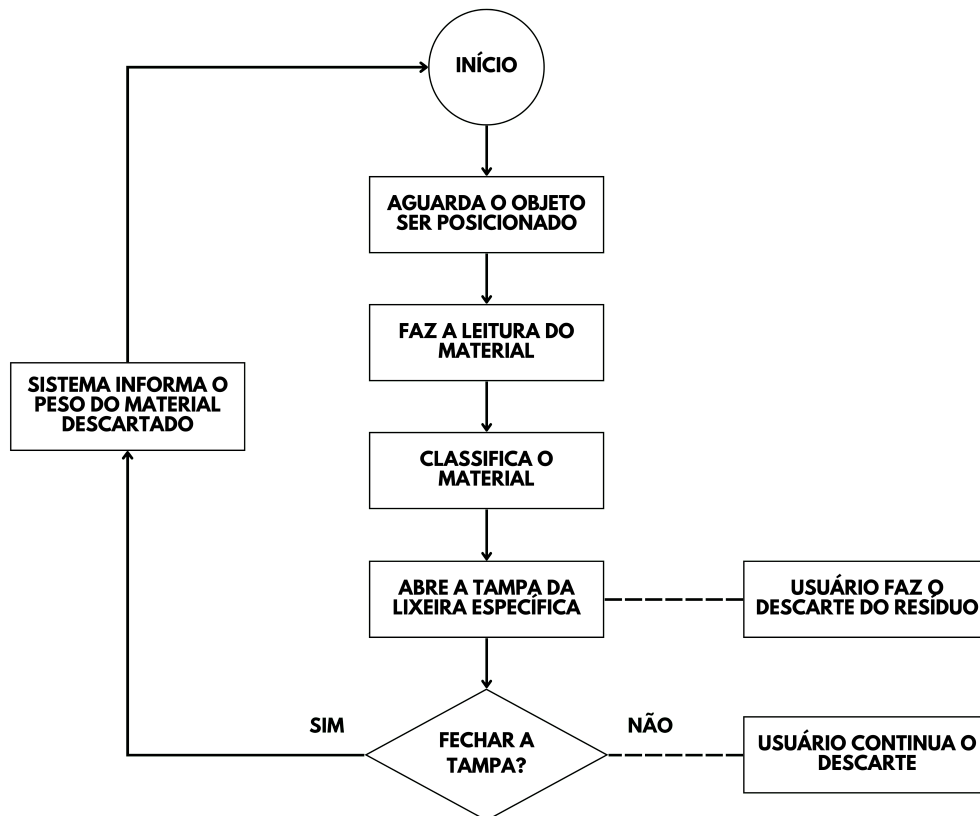
Um escopo do painel responsável pela classificação dos resíduos sólidos urbanos pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12 – Escopo do painel de classificação



Fonte: Elaborada pelo autor.

O funcionamento do sistema segue a seguinte sequência: o usuário posiciona o lixo na face do sensor ultrassônico, dando início a etapa de classificação do material. Após isso, o usuário posiciona o material na face do sensor indutivo e dos sensores capacitivos, realizando o cruzamento lógico e classificando qual é o tipo de material. No momento que o material é classificado, a tampa da respectiva lixeira é aberta e o usuário pode depositar o material. Na Figura 13 pode ser visualizado o fluxograma de funcionamento do sistema.

Figura 13 – Fluxograma do sistema

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.7.3 Custos

Após a definição dos componentes, foi realizado o levantamento de custos do projeto. A placa de desenvolvimento utilizada foi o Arduino Mega 2560. A comunicação Wi-Fi é realizada pelo módulo ESP8266 ESP-01S, responsável pela comunicação com o servidor WEB, após cada utilização do sistema. Na Tabela 14 é exposta a relação dos materiais utilizados no desenvolvimento do sistema.

Tabela 14 – Tabela de custos do sistema

Item	Descrição	Qtd	Vr. Unit. (R\$)	Vr. Total (R\$)
1	Sensor De Distância Ultrassônico HC-SR04	1	14,90	14,90
2	Sensor Indutivo LJ12A3-4-Z/BX	1	9,00	9,00
3	Sensor Capacitivo LJC18A3-B-Z/BX	4	19,25	77,00
4	Chave Táctil 12x12 mm com Capa Verde	1	2,00	2,00
5	Chave Táctil 12x12 mm com Capa Vermelha	1	2,00	2,00
6	Display Lcd 16x2 Backlight Azul	1	19,90	19,90
7	Módulo I2C para Display Lcd 16x2	1	12,90	12,90
8	Micro Servo Hextronik HXT900	4	29,90	119,60
9	Micro Servo Turnigy TG9e	1	29,90	29,90
10	Sensor de Peso/Célula de Carga 10 kg	5	42,90	214,50
11	Arduino Mega 2560 R3 Compatível CH340 + Cabo USB	1	149,90	149,90
12	Fonte 12V 1.5A 110/220 VAC P4	1	16,90	16,90
13	Fonte 5V 2A 110/220 VAC P4	1	14,25	14,25
14	Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01S	1	34,10	34,10
15	Adaptador Módulo Wi-Fi ESP8266 ESP-01S 3,3V/5V	1	22,90	22,90
16	Lixeira com pedal	5	23,00	115,00
				Valor Total = R\$854,75

Fonte: Elaborada pelo autor.

Por meio dos valores expostos na Tabela 14 pode ser observado que o valor total para o desenvolvimento do sistema foi de R\$ 968,75. Em outras palavras, a partir de um investimento abaixo de mil reais, é possível implantar um sistema capaz de otimizar o processo de gerenciamento de resíduos, tendo como resultado um maior aproveitamento de RSUs.

3.8 Ubidots

O Ubidots é uma plataforma de desenvolvimento IoT que permite conectar hardwares e softwares, fornecendo um ambiente que permite monitorar e controlar dispositivos, além de possibilitar a automatização de processos. Além disso, o Ubidots disponibiliza uma Interface de Programação de Aplicação ou Application Programming Interface (API), que possibilita o desenvolvimento de aplicativos com funcionalidades específicas para controle e monitoramento, utilizando ferramentas elinguagens de programação (MOHAMMED; SELMAN, 2020).

No presente trabalho, a plataforma Ubidots foi utilizada para exibir as informações captadas pelas células de peso a cada utilização do sistema, através de dashboards que apresentam o peso captado por cada sensor. Cada lixeira possui a sua própria célula de carga, o que permite que o peso de cada lixeira seja identificado individualmente. As informações foram armazenadas em variáveis, que foram utilizadas para armazenar os valores disponibilizados por cada célula.

O método HTTP POST foi utilizado para realizar o envio de dados para a plataforma Ubidots. O método de requisição POST foi projetado para solicitar ao servidor web que aceite os

dados anexados no corpo da mensagem de requisição para armazenamento. Os dados enviados ao servidor através do método POST são armazenados na requisição HTTP.

Para realizar a formatação dos dados enviados para a plataforma Ubidots através do módulo Wi-Fi, foi utilizado o formato de dados JavaScript Object Notation (JSON), que é uma formatação utilizada para estruturação de dados em formato de texto, com o objetivo de transmiti-los entre diferentes sistemas, como em aplicações cliente-servidor ou aplicativos móveis. JSON é um tipo de dados HTTP e é composto por uma coleção de pares de nome/valor (WEHNER; PIBERGER; GöHRINGER, 2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho se concentra no desenvolvimento de um sistema capaz de otimizar o processo de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos. O projeto desenvolvido consiste em um painel de classificação responsável por identificar diferentes tipos de resíduos através do uso de sensores. Os materiais que podem ser identificados são: metais, resíduos orgânicos, vidros, papéis e plásticos.

Através da Figura 14 é possível visualizar o painel de classificação desenvolvido após sua inicialização.

Figura 14 – Painel de classificação após a inicialização do sistema



Fonte: Elaborada pelo autor.

A mensagem "Posicione no Início" apresentada pelo display faz referência ao sensor ultrassônico, que representa o primeiro sensor pertencente ao sistema. No momento que o sensor descrito identifica a presença de um material, inicia-se o momento de classificação do resíduo, onde o usuário precisará posicioná-lo na face dos sensores responsáveis por classificar o tipo de material em questão.

Além do painel de classificação, o sistema inclui a utilização de cinco lixeiras seletivas, onde cada uma corresponde a um tipo de material. Cada lixeira possui em seu interior um servo motor e um sensor de peso, responsáveis pela abertura da tampa da lixeira após a classificação do tipo do material posicionado na face dos sensores e por informar o peso dos materiais descartados pelos usuários, respectivamente. Após o depósito ser realizado pelo usuário, a informação relacionada ao peso do material descartado é enviada para a plataforma IoT Ubidots.

O sistema completo pode ser visualizado na Figura 15.

Figura 15 – Sistema completo

Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram capturadas algumas imagens para demonstrar o funcionamento real do sistema. Através da Figura 16 é possível visualizar o painel de classificação no momento em que o sensor ultrassônico identifica a presença de um material plástico em sua face sensora. Nesse momento, o display apresenta o texto "Posicione nos Sensores", que tem como objetivo instruir os usuários a posicionarem o material na face dos sensores responsáveis pela classificação do material. No momento descrito, o usuário precisa realizar o posicionamento do material na face dos sensores.

Figura 16 – Painel de classificação após a identificação do material pelo sensor ultrassônico

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na sequência, o material foi posicionado na face dos sensores responsáveis pela classificação do material. Com isso, o material foi classificado como plástico. O momento da classificação do tipo de material pode ser visto na Figura 17. No cenário descrito, o display apresentou o texto

"Resíduo: Plástico", referente ao tipo do material classificado. Caso o sistema não seja capaz de classificar o material, será exibida a mensagem "Material Não Reconhecido".

Figura 17 – Classificação do material



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a classificação do material, a tampa da lixeira que corresponde ao tipo de material classificado é aberta. No teste realizado, o material utilizado foi um plástico, logo, a lixeira aberta corresponde aos materiais plásticos. O momento da abertura da tampa da lixeira correspondente ao tipo de material classificado pode ser verificada através da Figura 18.

Figura 18 – Abertura da lixeira



Fonte: Elaborada pelo autor.

Durante o período em que a tampa da lixeira está aberta, o usuário pode escolher entre fechar ou mantê-la aberta, dependendo da quantidade de resíduos de mesmo tipo que o usuário deseje depositar. No período descrito, é apresentada a mensagem "Fechar a Tampa", juntamente

com duas opções, onde o usuário poderá escolher entre "Sim" ou "Não". Caso o usuário pressione o botão que corresponde a opção "Não", a tampa da lixeira continuará aberta. Caso pressione a opção "Sim", a tampa será fechada. Se por acaso o usuário não escolher nenhuma das duas opções, a tampa será fechada após um período de tempo automaticamente. O momento em que o display apresenta a mensagem descrita pode ser visualizado através da Figura 19.

Figura 19 – Mensagem apresentada no momento em que a tampa da lixeira está aberta



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após o fechamento da tampa da lixeira correspondente ao tipo do material classificado, será exibido por meio do display o peso do material ou dos materiais de mesmo tipo depositados pelo usuário. No teste realizado, o peso do material depositado foi de 26 gramas, nesse caso, a mensagem apresentada foi "Depositou: 0.026 gramas". O peso do material classificado pode ser visto através da Figura 20. Caso o sistema classifique o material e a tampa da lixeira seja aberta, mas o usuário não deposite nenhum material, será exibida a mensagem "Nenhum Depósito".

Figura 20 – Mensagem apresentada no momento em que o peso do material depositado é apresentado



Fonte: Elaborada pelo autor.

A análise dos resultados obtidos pelo sistema desenvolvido foi dividida em duas etapas. Primeiramente, foi verificado o desempenho e as limitações do painel de classificação através da análise de diferentes tipos de materiais em condições variadas. A eficiência do sistema em classificar cada tipo de resíduo analisado foi baseada nos percentuais de verdadeiro positivo (VP), verdadeiro negativo (VN), falso positivo (FP) e falso negativo (FN) alcançados, os quais foram posteriormente analisados através de uma métrica de avaliação. Na sequência, foi mensurada a precisão dos sensores de peso inseridos em cada lixeira por meio da comparação da medição dos pesos dos materiais através de uma balança convencional e dos sensores de peso utilizados no sistema, por meio dos erros relativos percentuais obtidos através dos testes realizados.

4.1 Desempenho e Limitações do Painel de Classificação

Foram realizados testes no sistema de classificação através da análise de diferentes tipos de materiais em condições variadas, com o objetivo de encontrar possíveis limitações no sistema desenvolvido. Os testes foram realizados posicionando corretamente os materiais na face dos sensores responsáveis pela classificação dos resíduos. No Quadro 10 são apresentados os materiais utilizados no decorrer dos testes, de acordo com suas classificações.

Quadro 10 – Materiais testados em suas respectivas classificações

Metais	Vidros
- Fios de metal (estanho e cobre); - Baterias; - Pregos; - Chaves; - Embalagens de aço; - Ferramentas de ferro; - Embalagens de alumínio.	- Garrafas de bebida; - Frascos de perfume; - Copos; - Utensílios de cozinha; - Potes de alimento.
Orgânicos	Papéis
- Frutas; - Legumes.	- Lenços; - Folhas A4; - Embalagens de leite; - Papelões.
Plásticos	
- Poli (tereftalato de etileno) - (PET - 1); - Polietileno de alta densidade - (PEAD - 2); - Poli (cloreto de vinila) - (PVC - 3); - Polietileno de baixa densidade - (PEBD - 4); - Polipropileno - (PP - 5); - Poliestireno - (PS - 6); - Outros - (7).	

Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação de desempenho e limitações do sistema foi realizada através de testes, com base nos percentuais de VP, VN, FP e FN. A avaliação descrita ocorreu por meio de duas etapas:

Primeiramente, foi analisada a eficiência do painel desenvolvido em classificar diferentes

tipos de resíduos pertencentes ao mesmo tipo de material, por meio de tabelas compostas pelos percentuais descritos anteriormente.

A eficiência do sistema em realizar a classificação de um determinado tipo de resíduo foi baseada no percentual de verdadeiro positivo resultante, que pode ser alcançado a partir da seguinte fórmula:

$$\text{Verdadeiro positivo} = \frac{\text{Qtd. de resíduos identificados corretamente}}{\text{Qtd. total de amostras}} \quad (4.1)$$

Para considerar se o sistema é capaz de classificar satisfatoriamente um resíduo, foi considerado um percentual mínimo de VP de 70%, que foi calculado a partir da equação apresentada anteriormente, em função da quantidade de amostras utilizadas para cada tipo de resíduo. Os testes descritos foram realizados para cada um dos cinco tipos de materiais classificáveis pelo sistema: metais, resíduos orgânicos, vidros, papéis e plásticos.

Posteriormente, foi feita uma comparação dos resultados alcançados por meio dos testes realizados, através da métrica de avaliação denominada sensibilidade.

A sensibilidade avalia a capacidade do sistema em detectar com sucesso os resultados classificados como positivos, sendo utilizada preferencialmente em situações em que os falsos negativos são considerados mais prejudiciais que os falsos positivos. A métrica da sensibilidade é obtida por meio da proporção dos classificados como positivos em relação ao total de positivos. Altos valores de sensibilidade indicam altos valores de verdadeiros positivos, mesmo quando se leva em conta o total de falsos negativos (PARIKH *et al.*, 2008). A métrica em questão pode ser obtida a partir da seguinte equação:

$$\text{Sensibilidade} = \frac{VP}{VP + FN} \quad (4.2)$$

Com base nos testes realizados, os seguintes resultados foram alcançados.

4.1.1 Tipos de Resíduos

4.1.1.1 Metais

Para realização dos testes relacionados aos materiais metálicos, foram posicionados na face do painel os seguintes tipos de metal: ferro, aço, alumínio, estanho e cobre. Nos cenários em que os resíduos estavam vazios, o sistema os reconheceu corretamente na maioria das tentativas. Nas situações em que os resíduos estavam preenchidos com algum tipo de líquido, o sistema também os classificou corretamente, devido ao fato de que os materiais metálicos são capazes de alterar o campo eletromagnético presente no interior do sensor indutivo independentemente

se estão preenchidos com algum líquido ou não. Na Tabela 15 são apresentados os resultados decorrentes dos testes realizados.

Tabela 15 – Percentual de aceitação dos resíduos de metal

Nº	Tipos de resíduos de metal	Nº de amostras	Verdadeiro positivo	Verdadeiro negativo	Falso positivo	Falso negativo
1	Fios de metal (estanho e cobre)	5	80%	-	-	20%
2	Baterias	10	100%	-	-	-
3	Pregos	5	100%	-	-	-
4	Chaves	4	100%	-	-	-
5	Embalagens de aço	5	100%	-	-	-
6	Ferramentas de ferro	6	100%	-	-	-
7	Embalagens de alumínio	8	100%	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após a realização dos testes, foi verificado que ao aproximar materiais metálicos de diâmetro reduzido da face do sensor indutivo, não gerou a sua ativação. A situação descrita ocorreu nos cenários em que foram testados fios de metal de diâmetro reduzido. O ocorrido se deve ao fato de que tais materiais não alteraram os parâmetros do campo eletromagnético gerado pelo oscilador LC presente no sensor.

Quadro 11 – Descarte dos resíduos de metal

Nº	Tipos de resíduos de metal	Descarte
1	Fios de metal (estanho e cobre)	Sim
2	Baterias	Sim
3	Pregos	Sim
4	Chaves	Sim
5	Embalagens de aço	Sim
6	Ferramentas de ferro	Sim
7	Embalagens de alumínio	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.2 Orgânicos

Os resíduos em questão foram analisados apenas na condição em que estavam limpos e secos. Foram utilizadas frutas e legumes para realização dos testes. O sistema foi capaz de identificar os resíduos orgânicos em todas as tentativas realizadas.

Tabela 16 – Percentual de aceitação dos resíduos orgânicos

Nº	Tipos de resíduos orgânicos	Nº de amostras	Verdadeiro positivo	Verdadeiro negativo	Falso positivo	Falso negativo
1	Frutas	5	100%	-	-	-
2	Legumes	5	100%	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 12 – Descarte dos resíduos orgânicos

Nº	Tipos de resíduos orgânicos	Descarte
1	Frutas	Sim
2	Legumes	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.3 Vidros

Os vidros não apresentaram restrições quando analisados nas condições em que estavam vazios. No cenário descrito, o sistema obteve êxito em todas as tentativas. Foram testadas garrafas de bebidas, frascos de perfume, copos, utensílios de cozinha e potes de alimento. Quando os resíduos foram preenchidos com algum tipo de líquido, o sistema falhou em todas as tentativas, devido a constante dielétrica do líquido ser superior à do vidro. Na Tabela 17 podem ser observados os resultados alcançados dentro da condição em que os resíduos não estavam preenchidos com algum líquido.

Tabela 17 – Percentual de aceitação dos resíduos de vidro

Nº	Tipos de resíduos de vidro	Nº de amostras	Verdadeiro positivo	Verdadeiro negativo	Falso positivo	Falso negativo
1	Garrafas de bebida	5	100%	-	-	-
2	Frascos de perfume	6	100%	-	-	-
3	Copos	8	100%	-	-	-
4	Utensílios de cozinha	6	100%	-	-	-
5	Potes de alimento	3	100%	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

Quadro 13 – Descarte dos resíduos de vidro

Nº	Tipos de resíduos de vidro	Descarte
1	Garrafas de bebida	Sim
2	Frascos de perfume	Sim
3	Copos	Sim
4	Utensílios de cozinha	Sim
5	Potes de alimento	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.4 Papéis

Os papéis foram testados em condições específicas. A primeira situação consistiu em testá-los intactos e em unidade. Posteriormente, foram testados sem levar em consideração o aspecto anterior, de forma que estivessem dobrados ou amassados. Na Tabela 18 são apresentados os resultados dos testes realizados com materiais de papel, nos cenários onde as folhas A4 e lenços foram submetidos a condições específicas.

Tabela 18 – Percentual de aceitação dos resíduos de papel

Nº	Tipos de resíduos de papel	Nº de amostras	Verdadeiro positivo	Verdadeiro negativo	Falso positivo	Falso negativo
1	Lenços dobrados	10	70%	-	-	30%
2	Bolas de papel A4	10	80%	-	-	20%
3	Embalagens de leite	4	100%	-	-	-
4	Caixas de papelão	8	75%	-	-	25%
5	Caixas de lenço	3	100%	-	-	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema foi capaz de identificar os diferentes tipos de papel satisfatoriamente. Nos cenários em que as folhas A4 e lenços foram testados em unidade, o sistema falhou em todas as tentativas, devido a espessura reduzida do material. Nos casos em que estavam dobrados ou amassados, o sistema os classificou com maior facilidade.

Quadro 14 – Descarte dos resíduos de papel

Nº	Tipos de resíduos de papel	Descarte
1	Lenços dobrados	Sim
2	Bolas de papel A4	Sim
3	Embalagens de leite	Sim
4	Caixas de papelão	Sim
5	Caixas de lenço	Sim

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1.1.5 Plásticos

Para realização dos testes referentes aos resíduos plásticos, foram analisados os seis tipos de plásticos apresentados na Tabela 13, além de plásticos do tipo PLA. Na condição em que os resíduos estavam vazios, o sistema os classificou corretamente em todas as tentativas realizadas. Nas situações em que os resíduos estavam preenchidos com algum tipo de líquido, o sistema falhou em todas as tentativas, devido ao mesmo motivo verificado nos vidros. Na Tabela 19 são apresentados os resultados dos testes realizados dentro da primeira condição apresentada, onde os resíduos estavam vazios.

Tabela 19 – Percentual de aceitação dos resíduos de plástico

Nº	Tipos de resíduos de plástico	Nº de amostras	Verdadeiro positivo	Verdadeiro negativo	Falso positivo	Falso negativo
1	Poli (tereftalato de etileno) (PET - 1)	5	100%	-	-	-
2	Polietileno de alta densidade (PEAD - 2)	10	100%	-	-	-
3	Poli (cloreto de vinila) (PVC - 3)	4	100%	-	-	-
4	Polietileno de baixa densidade (PEBD - 4)	4	100%	-	-	-
5	Polipropileno (PP - 5)	15	100%	-	-	-
6	Poliestireno (PS - 6)	3	100%	-	-	-
7	Outros (7)	6	100%	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor.

Quadro 15 – Descarte dos resíduos de plástico

Tipos de resíduos de plástico	Descarte
Poli (tereftalato de etileno) (PET - 1)	Sim
Polietileno de alta densidade (PEAD - 2)	Sim
Poli (cloreto de vinila) (PVC - 3)	Sim
Polietileno de baixa densidade (PEBD - 4)	Sim
Polipropileno (PP - 5)	Sim
Poliestireno (PS - 6)	Sim
Ácido Polilático (PLA - 7)	Sim

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.2 Métrica de Avaliação

A métrica de avaliação da sensibilidade foi utilizada para medir o desempenho do sistema desenvolvido. Caso o sistema classifique corretamente um determinado resíduo, o teste se encaixa como um caso de verdadeiro positivo. No cenário em que um determinado resíduo não é identificado pelo sistema, o teste é considerado como falso negativo, o que torna a métrica da sensibilidade eficiente para avaliar o sistema, pois os falsos negativos são mais importantes que os falsos positivos. Por meio da Tabela 20 é possível analisar os percentuais referentes a métrica de avaliação utilizada.

Tabela 20 – Métrica de Avaliação

Métrica de avaliação	Célula de carga				
	Lixeira				
	Metais	Orgânicos	Vidros	Papéis	Plásticos
Sensibilidade	97,67%	100%	100%	80%	100%

Fonte: Elaborada pelo autor.

O painel de classificação foi capaz de identificar satisfatoriamente os cinco tipos de materiais analisados através dos testes realizados. Por meio da Tabela 20 é possível inferir que o tipo de material que obteve um menor percentual referente a métrica utilizada foi o papel, devido a sua espessura reduzida. Caso sejam tipos de papel que possuam uma maior espessura ou estejam dobrados ou agrupados, o sistema é capaz de classificá-los com uma maior eficiência.

O painel de classificação foi capaz de identificar satisfatoriamente os materiais metálicos, mas não foi capaz de identificar fios metálicos de diâmetro reduzido, por não alterarem os parâmetros do campo eletromagnético gerado pelo oscilador LC presente no sensor.

No que se refere aos resíduos orgânicos, vidros e plásticos, o sistema foi capaz de classificá-los corretamente em todas as tentativas realizadas.

As situações descritas são referentes aos testes realizados em cenários onde os materiais não estavam preenchidos parcialmente ou completamente por algum tipo de líquido.

4.2 Análise da Precisão dos Sensores de Peso

Com o objetivo de medir o peso dos materiais depositados pelos usuários nas lixeiras presentes no sistema, foram inseridos células de carga anexadas a plataformas utilizadas em balanças convencionais, como pode ser observado na Figura 21.

Figura 21 – Lixeiras

Fonte: Elaborada pelo autor.

O princípio de funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou strain gauge, quando submetido a uma deformação. Um exemplo de uma célula de carga pode ser visualizado na Figura 22.

Figura 22 – Célula de carga posicionada sob uma plataforma



Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido ao fato de que as superfícies do fundo das lixeiras utilizadas não são totalmente planas, não foi possível posicionar os sensores de peso de forma que as células de carga ficassem em suas posições ideais, devido a isso, foram observadas variações nos pesos medidos pelos sensores presentes em cada lixeira. No início dos testes, foi medido o peso de determinados materiais através de uma balança convencional. Após isso, o peso dos mesmos materiais foram medidos através dos sensores de peso inseridos em cada lixeira.

Através da Tabela 21 é possível visualizar a comparação dos pesos medidos entre uma balança convencional e os sensores de peso presentes nas lixeiras utilizadas no sistema.

Tabela 21 – Comparação dos pesos medidos por uma balança convencional e os sensores de peso presentes nas lixeiras

Material	Peso (gramas)					
	Balança	Lixeira				
		Metais	Orgânicos	Vidros	Papéis	Plásticos
Bateria	34	33	34	33	36	32
Caixa de lenço	15	16	17	13	18	14
Ferramenta de aço	139	136	145	136	153	135
Arame	4	4	4	4	4	4
Copo de plástico	15	16	15	14	16	13
Bola de papel	10	11	10	9	11	8
Garrafa de plástico	10	11	10	10	11	7
Papelão	5	6	7	5	7	5
Embalagem de alumínio	107	108	110	105	119	103
Ferramenta de ferro	337	338	345	332	374	329
Copo de vidro	117	117	118	116	131	111
Frasco de perfume	164	165	168	161	182	155
Embalagem de aço	91	91	94	88	100	85
Garrafa de vidro	191	189	197	190	211	190
Fruta	144	140	147	134	159	142

Fonte: Elaborada pelo autor.

A medida que os testes foram realizados, foi observado que quanto maior a inclinação do sensor de peso presente no interior da lixeira, maior foi a variação do peso medido. Além disso, outro fator que aumentou a variação descrita foi o peso do material. À medida que o peso do material crescia, também crescia a variação dos pesos calculados pelos sensores.

Por meio dos dados presentes na Tabela 21 foi possível calcular o erro percentual relativo decorrente da variação entre a medição dos materiais testados, através da utilização de uma balança convencional e dos sensores de peso presentes em cada lixeira. O erro percentual, também conhecido como erro de porcentagem, é utilizado para medir a imprecisão de uma medida e é expresso em termos de percentual. O erro relativo é calculado através da divisão entre o erro absoluto e o valor exato. O erro absoluto é a magnitude da diferença entre o valor exato e o valor aproximado (WU; BARALDO; FURLANUT, 1995).

Os erros relativos percentuais foram obtidos através da seguinte fórmula:

$$Erro\ percentual = \frac{|Valor\ aproximado - Valor\ exato|}{Valor\ exato} * 100 \quad (4.3)$$

Os erros obtidos podem ser visualizados na Tabela 22.

Tabela 22 – Erros relativos percentuais

Material	Célula de carga				
	Lixeira				
	Metais	Orgânicos	Vidros	Papéis	Plásticos
Bateria	2,94%	0%	2,94%	5,89%	5,89%
Caixa de lenço	6,67%	13,33%	13,33%	20%	6,67%
Ferramenta de aço	2,16%	4,32%	2,16%	10,07%	2,88%
Arame	0%	0%	0%	0%	0%
Copo de plástico	6,67%	0%	6,67%	6,67%	13,33%
Bola de papel	10%	0%	10%	10%	20%
Garrafa de plástico	10%	0%	0%	10%	30%
Papelão	20%	40%	0%	40%	0%
Embalagem de alumínio	0,93%	2,8%	1,87%	11,21%	3,74%
Ferramenta de ferro	0,3%	2,37%	1,48%	10,98%	2,37%
Copo de vidro	0%	0,85%	0,85%	11,96%	5,13%
Frasco de perfume	0,61%	2,44%	1,83%	10,97%	5,49%
Embalagem de aço	0%	3,3%	3,3%	9,89%	6,59%
Garrafa de vidro	10,47%	3,14%	0,52%	10,47%	0,52%
Fruta	2,78%	2,08%	6,94%	10,42%	1,39%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Posteriormente, foi calculada a média dos erros percentuais obtidos, com o objetivo de verificar a taxa de erro alcançada para cada sensor de peso. As médias alcançadas podem ser visualizadas a partir da Tabela 23.

Tabela 23 – Média dos erros relativos percentuais

Lixeira				
Metais	Orgânicos	Vidros	Papéis	Plásticos
4,9%	4,97%	3,46%	11,9%	6,93%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das médias apresentadas é possível afirmar que a inserção dos sensores de peso no interior de cada lixeira teve um resultado positivo. Apesar das lixeiras referentes a papéis e plásticos terem apresentado uma média de 11,9% e 6,93%, respectivamente, as lixeiras referentes ao metais, orgânicos e vidros apresentaram uma média abaixo de 5%.

4.3 Visualização das Informações dos Sensores de Peso

Para possibilitar a visualização das informações relacionadas ao depósito de materiais pelos usuários, foram utilizadas dez variáveis responsáveis por armazenar os valores das medições realizadas através dos sensores de peso. Cinco das variáveis citadas foram criadas para armazenar os pesos medidos pelas células de carga, com cada variável correspondendo a um sensor de peso. Na inicialização do sistema, as variáveis são inicializadas com o valor 0, devido a calibração dos sensores de peso. As variáveis são atualizadas na plataforma IoT no momento da inicialização e após a utilização do sistema, caso ocorra alguma variação do peso medido pelos sensores.

As cinco variáveis restantes são responsáveis por armazenar os pesos relacionados aos depósitos realizados pelos usuários. Caso seja depositado um material metálico, será calculada a variação do peso medido pela célula de carga presente no interior da lixeira, que corresponde ao tipo do material depositado, no momento anterior e posterior à realização do depósito. A variação medida será armazenada na variável responsável por armazenar os valores relacionados ao depósito de materiais metálicos e atualizada na plataforma IoT, após a utilização do sistema. Consequentemente, a variável responsável por armazenar o valor do peso atual da lixeira dos metais também terá o seu valor atualizado.

Os valores das variáveis podem ser visualizados por meio da plataforma IoT Ubidots, que fornece recursos para a criação de dashboards. No projeto atual, foram criados dois dashboards, onde o primeiro é responsável por armazenar os valores relacionados ao peso atual das lixeiras. Já o segundo é responsável por apresentar os valores dos depósitos realizados pelos usuários.

Os dois dashboards criados podem ser visualizados nas Figuras 23 e 24. Além dos pesos, são exibidas a data e a hora da última medição realizada.

Figura 23 – Dashboard que apresenta o peso atual presente nas lixeiras

PESO - LIXEIRAS

VARIABLE NAME	DATE	LAST VALUE
METAIS	26/08/2022 15:44	68.00
ORGÂNICOS	26/08/2022 15:42	7.00
VIDROS	26/08/2022 15:44	95.00
PAPÉIS	26/08/2022 15:11	0.00
PLÁSTICOS	26/08/2022 15:44	38.00

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24 – Dashboard que apresenta os depósitos realizados pelos usuários

DEPÓSITO - LIXEIRAS

DATE	METAIS	ORGÂNICOS	VIDROS	PAPÉIS	PLÁSTICOS
26/08/2022 15:44	---	---	---	---	11.00
26/08/2022 15:13	72.00	---	---	---	---
26/08/2022 15:13	---	---	---	---	27.00
26/08/2022 15:12	---	---	124.00	---	---
26/08/2022 14:55	72.00	---	---	---	---
26/08/2022 14:55	---	---	---	---	27.00
26/08/2022 14:55	---	---	128.00	---	---
26/08/2022 14:29	---	---	---	---	27.00
26/08/2022 14:26	---	---	---	---	4.00
26/08/2022 14:26	---	---	129.00	---	---

Fonte: Elaborada pelo autor.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de identificação de resíduos de baixo custo, tornando viável sua implantação em ecopontos e locais com grande circulação de pessoas. Outro fator levado em consideração foram os componentes a serem utilizados no projeto, buscando-se construir um protótipo que possuísse uma maior simplicidade e facilidade de utilização. A partir do estudo bibliográfico foi verificado que diferentes tipos de sensores já foram utilizados com o intuito de identificar diferentes tipos de materiais. Além disso, foi observado que quando se trata da implementação de sistemas de gerenciamento de resíduos, os sensores de proximidade indutivo e capacitivo são os mais utilizados, por cumprirem satisfatoriamente o objetivo de identificar diferentes tipos de resíduos.

Por meio da realização de estudos relativos ao princípio de funcionamento dos sensores descritos, foi possível definir um sistema eficiente para classificação de cinco categorias de materiais: metais, resíduos orgânicos, vidros, papéis e plásticos. Para realizar a detecção de objetos, dando início ao sistema de classificação, foi utilizado o sensor ultrassônico, que por meio dos testes realizados demonstrou ser o mais eficiente para realização do objetivo apresentado, considerando que outra possibilidade seria a utilização de um sensor infravermelho, que apresentou limitações quando exposto à luz solar.

Através dos testes de desempenho do sistema foi possível analisar quais tipos de resíduos o painel de classificação obteve uma maior taxa de aceitação, a partir dos percentuais aplicados de acordo com cada uma das cinco categorias de materiais. Como resultado dos testes, foi possível verificar que o sistema falhou em cenários onde os resíduos de vidro e de plástico estavam preenchidos com algum tipo de líquido, evidenciando uma limitação do sistema desenvolvido. Além da situação apresentada, foi observado que nos casos em que os papéis foram testados em unidade e intactos, o sistema não foi capaz de identificá-los, devido ao fato de que a espessura do material também é um fator que influencia na identificação dos materiais pelos sensores capacitivos. Apesar dos cenários descritos, o sistema obteve um resultado satisfatório em identificar os resíduos nos cenários onde estavam secos e vazios.

Posteriormente, foi analisada a precisão da medição dos sensores de peso presentes em cada lixeira. Através da média dos erros relativos calculados, os quais são decorrentes da variação da medição de uma balança convencional e dos sensores de peso presentes no interior das lixeiras, foi possível constatar que a inserção dos sensores de peso teve um resultado positivo, apesar das superfícies do fundo das lixeiras não serem totalmente planas, o que permitiria alcançar variações menores se comparadas às alcançadas por meio do sistema desenvolvido. Para visualização das informações geradas pelos sensores de peso, foi utilizada a plataforma IoT Ubidots, que possibilitou a criação de dashboards que apresentassem o peso atual presente em cada lixeira e o peso dos materiais depositados pelos usuários, a cada utilização do sistema.

Considerando os resultados obtidos, o trabalho desenvolvido representa um avanço nos estudos relacionados à classificação de materiais a partir de sensores, através do desenvolvimento de um protótipo eficiente e de baixo custo, que pode ser utilizado juntamente com as lixeiras seletivas presentes em diversos tipos de ambientes.

5.1 Trabalhos Futuros

Como possíveis trabalhos futuros pode-se apontar:

- Implementação de um sistema de depósito e retorno (SDR), com o objetivo de incentivar à devolução de materiais recicláveis pela sociedade através de um incentivo econômico para os usuários;
- Desenvolvimento de um molde 3D que possa ser acoplado a lixeira para que a célula de carga possa ficar em sua posição ideal;
- Desenvolvimento de uma interface gráfica para visualização dos dados coletados pelos sensores;
- Implementação de um sistema de comunicação sem fio utilizando a tecnologia LoRa, para que as informações coletadas pelos sensores possam ser enviadas para um servidor web;
- Implementação de um sistema de localização para otimizar o processo de coleta dos resíduos por parte das equipes responsáveis;
- Análise de outros meios capazes de classificar resíduos sólidos urbanos.

REFERÊNCIAS

- ABDEL-SHAFY, H.; MANSOUR, M. S. Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization. **Egyptian Journal of Petroleum**, v. 27, n. 4, p. 1275–1290, 2018.
- ABRELPE. **PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL 2021**. São Paulo, 2021. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama-2021>. Acesso em: 10 jan. 2022.
- AGARKHED, J.; DATTATRAYA, P. Y.; PATIL, S. A study of wireless sensor networks to comprehend their relevance to different applications. **Journal of Telecommunications and Information Technology**, v. 2, p. 3–13, 2020.
- AHMAD, M. *et al.* A review of internet of things (iot) connectivity techniques. In: **Recent trends and advances in wireless and IoT-enabled networks**. Suíça, Springer: Cham, 2019. p. 25–36.
- AL-RAZGAN, M.; ALFAQIH, T. Wireless sensor network architecture based on mobile edge computing. **Security and Communication Networks**, v. 2022, n. 5, p. 1–16, 2022.
- ALEKSANDER, M. B. *et al.* Implementation technology software-defined networking in wireless sensor networks. In: **2015 IEEE 8th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)**. Varsóvia: IEEE, 2015. v. 1, p. 448–452.
- ALI, A. W. A.; RAZAK, F. A. A.; HAYIMA, N. A review on the ac servo motor control systems. **ELEKTRIKA - Journal of Electrical Engineering**, v. 19, n. 2, p. 22–39, 2020.
- ANTONY, A. A.; THOMAS, B. A study on packet loss reduction methods and node registration methods in AODV for MANET. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, IOP Publishing, v. 396, n. 1, p. 1–8, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 10004**: resíduos sólidos – classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 13230**: embalagens e acondicionamento plásticos recicláveis - identificação e simbologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. **NBR 16182**: embalagens e acondicionamento - simbologia de orientação de descarte seletivo e de identificação de materiais. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.
- BALU, T. *et al.* Arduino based automated domestic waste segregator. In: **2020 5th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)**. Coimbatore, India: IEEE, 2020. p. 906–909.
- BRASIL. **Decreto Nº 10.936, de 12 de Janeiro de 2022**: Regulamenta a política nacional de resíduos sólidos, instituída pela lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. 2022. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2022/Decreto/D10936.htm. Acesso em: 10 jan. 2022.

CALLISTER, W. D. J.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CANSADO, J. C. A. **Instrumentalização de Redes de Sensores Sem Fio**. 2011. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

CEDEÑO, N. Z.; ASQUI, O. P.; CHAW, E. E. The performance of qos in wireless sensor networks. In: **2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)**. Coimbra: IEEE, 2019. p. 1–5.

CHEN, J. *et al.* Systematic development of a wireless sensor network for piezo-based sensing. **Journal of Sensors**, v. 2018, p. 1–12, 2018.

CHIURAZZI, M. *et al.* Novel capacitive-based sensor technology for augmented proximity detection. **IEEE Sensors Journal**, v. 20, n. 12, p. 6624–6633, 2020.

COELHO, S. *et al.* **Municipal Solid Waste Energy Conversion in Developing Countries: Technologies, Best Practices, Challenges and Policy**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 2019.

CONAMA. **RESOLUÇÃO CONAMA nº 275, de 25 de abril de 2001 Publicada no DOU no 117-E, de 19 de junho de 2001, Seção 1, página 80**. 2001. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=291>. Acesso em: 12 fev. 2022.

COSTA, M. S. **Otimização de posicionamento de nós roteadores em redes de comunicação sem fio aplicadas em automação industrial**. 2011. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

CURIAC, D.-I. Wireless sensor network security enhancement using directional antennas: State of the art and research challenges. **Sensors**, v. 16, n. 4, p. 1–15, 2016.

DOMINGUESCHE, F. B. Desenvolvimento de uma plataforma de internet das coisas (iot) integrado a redes de sensores sem fio. **Revista Tecnológica da Fatec Americana**, v. 9, n. 1, p. 51–67, 2021.

ELGENAIDI, W. *et al.* Reconfiguration of neighbouring nodes in coastal monitoring wireless sensor networks based on leader node recommendation. In: **2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)**. Barcelona, Espanha: IEEE, 2017. p. 348–352.

ELSAYED, S. A. *et al.* Theoretical and experimental investigation of dc servomotor. **PORT SAID ENGINEERING RESEARCH JOURNAL**, v. 18, n. 2, p. 25–31, 2014.

ENGMANN, F. *et al.* Prolonging the lifetime of wireless sensor networks: A review of current techniques. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 2018, n. 2, p. 1–23, 2018.

ERTAM, F. *et al.* A new iot application for dynamic wifi based wireless sensor network. In: **2020 International Conference on Electrical Engineering (ICEE)**. Istambul, Turquia: IEEE, 2020. p. 1–4.

FERRONATO, N.; TORRETTA, V. Waste mismanagement in developing countries: A review of global issues. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 16, n. 6, p. 1–28, 2019.

- GAO, H. *et al.* Visual object detection and tracking for internet of things devices based on spatial attention powered multi-domain network. **IEEE Internet of Things Journal**, PP, n. 99, p. 1–11, 2021.
- GAO, L. *et al.* Data collection methods based on mobile sink node. In: **Proceedings of the International Conference on Advances in Mechanical Engineering and Industrial Informatics**. China: Atlantis Press, 2015. p. 179–183.
- HAGAN, M. Inductive proximity sensors network in intelligent clothes. In: **2017 E-Health and Bioengineering Conference (EHB)**. Sinaia, Romania: IEEE, 2017. p. 225–228.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física – Volume 3**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- HAZRA, T.; GOEL, S. Solid waste management in kolkata, india: Practices and challenges. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 470–478, 2009.
- HEDAR, A.-R. *et al.* Wireless sensor networks fault-tolerance based on graph domination with parallel scatter search. **Sensors**, v. 20, n. 12, p. 1–27, 2020.
- IBGE. **Projeções e estimativas da população do Brasil e das Unidades da Federação**. 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/populacao/projecao/>. Acesso em: 11 fev. 2022.
- KARASKI, T. U. *et al.* **Embalagem e Sustentabilidade - Desafios e orientações no contexto da Economia Circular**. São Paulo, 2016.
- KATTI, A.; LOBIYAL, D. K. Node deployment strategies for a 2d wireless sensor network. In: **2017 International Conference on Computing, Communication and Automation (ICCCA)**. Greater Noida, India: IEEE, 2017. p. 658–663.
- KUMAR, N. *et al.* Prolong network lifetime in the wireless sensor networks: An improved approach. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 46, n. 4, p. 3631–3651, 2021.
- LEITE, N. D. *et al.* Lixões, aterros controlados e aterros sanitários: o que mudou no brasil após a publicação da lei federal 12.305/2010. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**. Natal, Rio Grande do Norte: ABES, 2019. p. 1–10.
- LI, Y. Data processing flow analysis of hierarchical structure system of internet of things. In: **2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)**. Nanchang, China: IEEE, 2021. p. 123–126.
- LI, Y.; BARTOS, R. A survey of protocols for intermittently connected delay-tolerant wireless sensor networks. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 41, n. 1, p. 411–423, 2013.
- LOPES, S.; MACHADO, S. Iot based automatic waste segregator. In: **2019 International Conference on Advances in Computing, Communication and Control (ICAC3)**. Mumbai, India: IEEE, 2019. p. 1–5.
- MOHAMMED, N.; SELMAN, N. Home energy management and monitoring using ubidots platform. **Al-Furat Journal of Innovations in Electronics and Computer Engineering**, v. 1, n. 3, p. 14–21, 2020.

- MUCELIN, C.; BELLINI, M. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Sociedade & Natureza (online)**, v. 20, n. 1, p. 111–124, 2008.
- MUNIR, A.; ANTOON, J.; GORDON-ROSS, A. Modeling and analysis of fault detection and fault tolerance in wireless sensor networks. **ACM Transactions on Embedded Computing Systems**, v. 14, n. 1, p. 1–43, 2015.
- MURAT, D. A new gateway node for wireless sensor network applications. **Scientific Research and Essays**, v. 11, n. 20, p. 213–220, 2016.
- NANDA, S.; BERRUTI, F. Municipal solid waste management and landfilling technologies: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 2, p. 1433–1456, 2020.
- NIŽETIĆ, S. *et al.* Internet of things (iot): Opportunities, issues and challenges towards a smart and sustainable future. **Journal of Cleaner Production**, v. 274, n. 1, p. 1–32, 2020.
- NUNES, A. M. da S. **Projeto LISA: Lixeira Inteligente Seletiva Automática**. 2018. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Engenharia da Computação. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- OGBITI, J. T. *et al.* Energy consumption in wireless sensor network. **Computer Engineering and Intelligent Systems**, v. 7, n. 8, p. 63–67, 2016.
- OMNEXUS. **Dielectric Constant**. 2022. Disponível em: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/dielectric-constant>. Acesso em: 10 jul. 2022.
- OTHMAN, M. F.; SHAZALIB, K. Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system. **Journal of Procedia Engineering**, v. 41, n. 1, p. 1204 – 1210, 2012.
- OTU, L.-S. The internet of economic things: The socio-economic transformation value of the internet of things (iot). In: **2019 International Conference on Cyber Security and Internet of Things (ICSIoT)**. Acra, Gana: IEEE, 2019. p. 109–113.
- PARDINI, K. **IoT-based waste management: a new approach for smart cities**. 2019. Dissertação (Mestrado) — Instituto Nacional de Telecomunicações, Santa Rita do Sapucaí, 2019.
- PARIKH, R. *et al.* Understanding and using sensitivity, specificity and predictive values. **Indian journal of ophthalmology**, v. 56, n. 1, p. 45–50, 2008.
- PRATES, L. F. S.; PIMENTA, C. F.; RIBEIRO, H. F. Alternativas tecnológicas para tratamento de resíduos sólidos urbanos. **APPREHENDERE – Aprendizagem & Interdisciplinaridade**, v. 1, n. 2, p. 1–6, 2019.
- PROTEGEER. **O que são Resíduos Sólidos?** 2017. Disponível em: <http://protegeer.gov.br/rsu/etapas-do-gerenciamento>. Acesso em: 31 jun. 2022.
- RAFEEQ, M. *et al.* Automation of plastic, metal and glass waste materials segregation using arduino in scrap industry. In: **2016 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)**. Coimbatore, India: IEEE, 2016. p. 1–5.
- RAGHAVENDRA, K.; MEERADEVI, M.; MUNDADA, M. R. Implementation of energy efficient data compression in cluster based wireless sensor network. In: **2017 International Conference on Circuits, Controls, and Communications (CCUBE)**. Bangalore, India: IEEE, 2017. p. 115–120.

SANTOS, M. N. dos; MANSANO, R. D. Wireless sensor networks for industrial process and industry 4.0. In: **2019 Microelectronics Students Forum**. São Paulo: Microelectronics Society (SBMicro) and Brazilian Computer Society (SBC), 2019.

SHARANYA, A. *et al.* Automatic waste segregator. In: **2017 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI)**. Udupi, India: IEEE, 2017. p. 1313–1319.

SILVA, F. A. *et al.* Tecnologia de nós sensores sem fio. **Universidade Federal de Minas Gerais**, 2011.

SINGH, C. P. *et al.* Automatic waste segregator as an integral part of smart bin for waste management system in a smart city. In: **2019 5th International Conference On Computing, Communication, Control And Automation (ICCUBE)**. Pune, India: IEEE, 2019. p. 1–5.

SINGH, N. A.; BORSCHBACH, M. Effect of external factors on accuracy of distance measurement using ultrasonic sensors. In: **2017 International Conference on Signals and Systems (ICSigSys)**. Bali, Indonésia: IEEE, 2017. p. 266–271.

SUNEHRA, D. *et al.* Implementation of an automatic waste segregator system using arduino uno. In: **2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)**. Maharashtra, Índia: IEEE, 2021. p. 1–6.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.

VERDONE, R. *et al.* **Wireless Sensor and Actuator Networks: Technologies, analysis and design**. 1. ed. Italy: Academic Press, 2008.

VINTI, G. *et al.* Municipal solid waste management and adverse health outcomes: A systematic review. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 8, p. 1–16, 2021.

WANG, y.-c. Data compression techniques in wireless sensor networks. **Pervasive Computing**, p. 1–12, 2012.

WARNEKE, B.; PISTER, K. Mems for distributed wireless sensor networks. In: **9th International Conference on Electronics, Circuits and Systems**. Dubrovnik, Croácia: IEEE, 2002. v. 1, p. 291–294.

WEHNER, P.; PIBERGER, C.; GÖHRINGER, D. Using json to manage communication between services in the internet of things. In: **2014 9th International Symposium on Reconfigurable and Communication-Centric Systems-on-Chip (ReCoSoC)**. Montpellier, França: IEEE, 2014. p. 1–4.

WILSON, D. *et al.* **Global Waste Management Outlook, United Nations Environment Programme (UNEP) and International Solid Waste Association (ISWA)**. Nairobi: UNEP, 2015.

WU, G.; BARALDO, M.; FURLANUT, M. Calculating percentage prediction error: A user's note. **Pharmacological research : the official journal of the Italian Pharmacological Society**, v. 32, n. 4, p. 241–248, 1995.

YOADA, R. M.; CHIRAWURAH, D.; ADONGO, P. B. Domestic waste disposal practice and perceptions of private sector waste management in urban accra. **BMC Public Health**, v. 14, n. 1, p. 1–10, 2014.

YOU, G.; ZHU, Y. Structure and key technologies of wireless sensor network. In: **2020 Cross Strait Radio Science Wireless Technology Conference (CSRSWTC)**. Fuchou, China: IEEE, 2020. p. 1–2.

YOUNUS, M. U. Analysis of the impact of different parameter settings on wireless sensor network lifetime. **International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)**, v. 9, n. 3, p. 16–21, 2018.

ZHANG, J.; WANG, Y. Design of remote control device using wireless sensor network and its use in intelligent monitoring of farmland information. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2021, n. 1, p. 1–13, 2021.

ZHU, Y. *et al.* An nb-iot-based smart trash can system for improved health in smart cities. In: **2019 15th International Wireless Communications Mobile Computing Conference (IWCMC)**. Tânger, Marrocos: IEEE, 2019. p. 763–768.