

Trabalho de Licenciatura em
Informática

**Desenvolvimento de um Protótipo de
Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos
Urbanos Baseado em Internet of Things
(IoT) e a sua Avaliação, caso de estudo:
Distrito Municipal de KaMpfumo - Maputo**

Autor: Ussene Jafar Noormamade

Maputo, Março de 2026



FACULDADE DE CIÊNCIAS
Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Informática

**Desenvolvimento de um Protótipo de
Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos
Urbanos Baseado em Internet of Things
(IoT) e a sua Avaliação, caso de estudo:
Distrito Municipal de KaMpfumo - Maputo**

Autor: Ussene Jafar Noormamade

Supervisor: Mestre, Yacub Mussá

Co-Supervisor: Mestre, Osvaldo Cossa

Maputo, Março de 2026

Dedicatória

Aos meus pais,

Abdul Rasaque Jafar Noormamade e Nabida Saraiva Ismael Guly

E aos meus irmãos,

Abdul Ismael Jafar Noormamade e Fazila Jafar Noormamade

Declaração de Honra

Declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura é resultado da minha investigação e que o presente trabalho será submetido apenas para a obtenção do grau de Licenciado em Informática, na Faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Março de 2026

Ussene Jafar Noormamade

Agradecimentos

A realização do presente trabalho contou com o apoio e a colaboração de várias pessoas, às quais expresso o meu sincero agradecimento.

Em primeiro lugar, manifesto o meu especial agradecimento ao Supervisor, Dr. Yacub Mussá, e ao Co-supervisor, Dr. Osvaldo Cossa, pela orientação científica, rigor académico, disponibilidade e contributos fundamentais ao longo de todas as fases de desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço, de forma particular, ao meu amigo e colega de trabalho Abubacar Massuque, pelo apoio prestado na identificação de fornecedores para a aquisição dos componentes, nomeadamente sensores e actuadores aplicados ao protótipo, contribuindo para a selecção de soluções com o melhor rácio custo-benefício. A sua colaboração foi igualmente relevante durante a fase de recolha de dados, tendo acompanhado a realização das entrevistas no Conselho Municipal da Cidade de Maputo, apoiando no registo de notas e na gestão das gravações, sempre que autorizadas pelos entrevistados.

Expresso também o meu agradecimento à minha irmã, Fazila Jafar Noormamade, pelo apoio na concepção e construção do modelo físico do protótipo de contentor, no qual foram integrados os componentes do sistema IoT desenvolvido no âmbito deste estudo.

Agradeço igualmente a Danelton Manhique, funcionário do Conselho Municipal da Cidade de Maputo, pelo apoio na identificação e no contacto com os funcionários indicados para a realização das entrevistas, facilitando o acesso às informações necessárias para a contextualização do estudo.

Resumo

O presente trabalho teve como objectivo desenvolver e avaliar um protótipo de sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos no Distrito Municipal de KaMpfumo, na Cidade de Maputo, Moçambique, com enfoque na aplicação de tecnologias baseadas na Internet das Coisas (IoT). O problema central residiu nas limitações operacionais dos sistemas tradicionais de recolha e gestão de resíduos, que dificultam a adopção de práticas mais eficientes e sustentáveis, sobretudo em contextos urbanos em crescimento.

A relevância do tema decorre do processo acelerado de urbanização e dos desafios sócio-ambientais associados à deposição inadequada de resíduos sólidos, os quais comprometem a organização do espaço urbano e a qualidade de vida da população. Neste contexto, o estudo assume um carácter tecnológico e aplicado, centrando-se no desenvolvimento de uma solução baseada em IoT para apoiar a monitorização e a optimização do processo de recolha de resíduos.

A metodologia adoptada incluiu uma revisão da literatura sobre gestão de resíduos sólidos urbanos e tecnologias IoT, bem como a concepção e implementação de um protótipo funcional, integrando sensores para a monitorização do nível de enchimento dos contentores, módulos de comunicação e uma plataforma web centralizada para o processamento e a visualização dos dados. Foram igualmente realizados testes experimentais com o objectivo de avaliar o desempenho e a viabilidade técnica da solução proposta.

Os resultados obtidos indicaram que o sistema desenvolvido apresenta potencial para melhorar a eficiência operacional da recolha de resíduos, optimizar a utilização dos recursos disponíveis e reduzir custos associados ao processo. Adicionalmente, a solução contribui para uma gestão mais organizada e informada dos resíduos sólidos urbanos, podendo apoiar iniciativas de melhoria da salubridade e sustentabilidade do ambiente urbano.

Conclui-se que a solução proposta é tecnicamente viável e apresenta potencial de replicação noutros contextos urbanos com características semelhantes, particularmente em cidades de países em desenvolvimento, desde que consideradas as especificidades locais e as condições de implementação.

Palavras-chave: gestão de resíduos sólidos urbanos; Internet das Coisas (IoT); sistemas inteligentes; monitorização de resíduos; eficiência operacional.

Abstract

This study aimed to develop and evaluate a prototype of an Internet of Things (IoT)-based urban solid waste management system applied to the KaMpfumo Municipal District, in the city of Maputo, Mozambique. The central problem addressed concerns the operational limitations of traditional waste collection systems, which hinder the adoption of more efficient and sustainable waste management practices in rapidly growing urban environments.

The relevance of the topic arises from accelerated urbanisation processes and the socio-environmental challenges associated with inadequate waste disposal, which affect urban organisation and overall quality of life. In this context, the research adopts a technological and applied approach, focusing on the development of an IoT-based solution to support waste monitoring and collection optimisation.

The adopted methodology included a literature review on urban solid waste management and IoT technologies, as well as the design and implementation of a functional prototype integrating level-monitoring sensors, communication modules and a centralised web platform for data processing and visualisation. Experimental tests were conducted to assess the technical performance and feasibility of the proposed solution.

The results indicated that the developed system has the potential to improve operational efficiency in waste collection processes, optimise the use of available resources and reduce associated operational costs. Furthermore, the solution supports a more organised and data-driven approach to urban waste management, contributing indirectly to improved urban sanitation and environmental sustainability.

It is concluded that the proposed system is technically viable and presents potential for replication in other urban contexts with similar characteristics, particularly in cities of developing countries, provided that local conditions and implementation constraints are duly considered.

Keywords: urban solid waste management; Internet of Things (IoT); intelligent systems; waste monitoring; operational efficiency.

Abreviaturas

API - Interface de Programação de Aplicativos

API REST - Interface de Programação de Aplicativos Representacionais

ADC - Conversor Analógico-Digital

CMCM - Conselho Municipal da Cidade de Maputo

CRUD - Create, Read, Update, Delete (Criar, Ler, Actualizar, Apagar)

CSS - Cascading Style Sheets

DIO - Digital Input/Output (Entrada/Saída Digital)

DMGRSUS - Direcção Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Salubridade

EPIs - Equipamentos de Protecção Individual

ESP8266 - Módulo Wi-Fi da família ESP da Espressif

GPS - Sistema de Posicionamento Global

GPRS - General Packet Radio Service

GSM - Global System for Mobile Communications

HTTP - Protocolo de Transferência de Hipertexto

IA - Inteligência Artificial

IDE - Integrated Development Environment (Ambiente Integrado de Desenvolvimento)

IoT - Internet of Things (Internet das Coisas)

JSON - JavaScript Object Notation

LED - Diodo Emissor de Luz

LoRaWAN - Long Range Wide Area Network

MCU - Microcontrolador

MTV - Model–Template–View (Arquitectura do Django)

NB-IoT - Narrowband Internet of Things

PCB - Placa de Circuito Impresso

POST - Método de envio de dados no protocolo HTTP

PWM - Pulse-Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)

RSD - Resíduos Sólidos Domésticos

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SIM - Subscriber Identity Module

SQL - Structured Query Language (Linguagem Estruturada de Consultas)

SSL/TLS - Secure Sockets Layer / Transport Layer Security

TCP/IP - Transmission Control Protocol / Internet Protocol

UART - Universal Asynchronous Receiver-Transmitter

UML - Unified Modeling Language (Linguagem Unificada de Modelação)

UI - Interface de Utilizador

UDP - User Datagram Protocol

Wi-Fi - Wireless Fidelity

WSN - Rede de Sensores Sem Fios

Glossário

Actuador

Dispositivo que executa uma acção física (abrir, fechar, ligar, desligar) em resposta a comandos provenientes de um sistema electrónico ou computacional.

Alerta

Notificação gerada automaticamente pelo sistema quando um parâmetro crítico (por exemplo, nível de enchimento do contentor) ultrapassa um limite predefinido.

Análise de Conteúdo

Técnica de investigação qualitativa utilizada para identificar padrões, temas ou categorias a partir de dados textuais, entrevistas ou documentos.

API REST

Interface de comunicação baseada no protocolo HTTP que permite a interoperabilidade entre sistemas por meio de operações padronizadas de leitura, escrita e actualização de dados.

Base de Dados Relacional

Sistema organizado de armazenamento de dados estruturados em tabelas relacionadas, permitindo consultas complexas e integridade referencial.

Big Data

Conjunto de métodos e tecnologias destinados à análise de grandes volumes de dados, caracterizados por elevada velocidade, variedade e variabilidade.

Camada de Aplicação

Nível superior da arquitectura IoT responsável pelo processamento, análise e visualização dos dados recolhidos pelos dispositivos.

Camada de Percepção

Primeira camada da arquitectura IoT, composta por sensores e microcontroladores que captam dados do ambiente físico.

Camada de Rede

Camada intermédia responsável pela transmissão dos dados recolhidos pelos sensores para servidores ou plataformas centrais.

Contentor Inteligente

Contentor equipado com sensores IoT capazes de monitorizar parâmetros como nível de enchimento, temperatura ou odores, enviando dados em tempo real para uma plataforma central.

Conversor Analógico-Digital (ADC)

Componente electrónico que converte sinais analógicos (como variações de tensão) em valores digitais manipuláveis por microcontroladores.

Dashboard (Painel de Controlo)

Interface visual que apresenta dados operacionais, estatísticos ou analíticos em tempo real, facilitando a tomada de decisão.

Django

Framework web de alto nível, baseado em Python, que adopta a arquitectura MTV (Model-Template-View) e fornece ferramentas para desenvolvimento rápido de aplicações web seguras e escaláveis.

Enchimento (Nível de)

Percentual de resíduos acumulados dentro de um contentor, conforme registado pelos sensores.

ESP8266 NodeMCU

Placa de desenvolvimento baseada no microcontrolador ESP8266, equipada com conectividade Wi-Fi, amplamente utilizada em projectos IoT.

HTTP POST

Método do protocolo HTTP utilizado para enviar dados a um servidor, como leituras de sensores ou submissão de formulários.

Internet das Coisas (IoT)

Rede de objectos físicos, sensores e dispositivos interligados via internet, capazes de comunicar dados sem intervenção humana directa.

Inteligência Artificial (IA)

Campo da computação que visa o desenvolvimento de algoritmos capazes de executar tarefas que normalmente exigem inteligência humana, como classificação, previsão ou reconhecimento de padrões.

Leitura (no contexto do sistema)

Registo individual de dados provenientes de um sensor IoT, incluindo nível de enchimento e timestamp.

LoRaWAN

Tecnologia de comunicação de longo alcance e baixo consumo energético, adequada para aplicações IoT distribuídas geograficamente.

Middleware

Camada lógica que faz a mediação entre os dispositivos IoT e o sistema de aplicação, realizando validação, normalização e encaminhamento de dados.

Modelo MTV (Model-Template-View)

Arquitectura interna do framework Django, que separa os dados (Model), a lógica (View) e a apresentação (Template).

Missão de Recolha

Conjunto de contentores atribuídos a um motorista para recolha num determinado percurso e horário.

Painel de Controlo Móvel

Interface acessível por dispositivos móveis que permite acompanhar, em tempo real, o estado dos contentores, rotas e alertas.

Redes LPWAN

Família de tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo energético, incluindo LoRaWAN e NB-IoT.

Recolha Porta-a-Porta

Método de recolha em que os resíduos são recolhidos directamente nas residências, segundo horários definidos pelas autoridades municipais.

Sensor Ultrassónico HC-SR04

Sensor que utiliza ondas sonoras de alta frequência para medir a distância até um objecto, amplamente usado em projectos IoT.

Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos

Conjunto de operações que englobam a recolha, transporte, tratamento e disposição final dos resíduos sólidos urbanos.

Txuna ECO

Plataforma web autónoma desenvolvida com Django (Python), responsável pelo armazenamento, processamento, análise e visualização dos dados IoT recolhidos pelos contentores inteligentes. Expondo uma API REST, gere alertas, missões de recolha e analítica operacional, oferecendo autonomia total, privacidade dos dados e elevada capacidade de personalização.

UML (Unified Modeling Language)

Linguagem padronizada para modelação de sistemas de software, utilizada para representar casos de uso, classes, estados e sequências de eventos.

Wi-Fi (Wireless Fidelity)

Tecnologia de comunicação sem fios que permite ligação de dispositivos a redes locais ou à internet.

Índice

Dedicatória.....	i
Declaração de Honra.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Abreviaturas.....	vi
Glossário	viii
Lista de Figuras.....	xv
Lista de Tabelas	xvi
Introdução.....	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Definição do problema	2
1.3. Objectivos.....	4
1.3.1. Objectivo Geral.....	4
1.3.2. Objectivos Específicos.....	4
Revisão de Literatura	5
2.1 Gestão de Resíduos Sólidos	5
2.1.1. Conceitos e Definições	5
2.1.2. Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos.....	6
2.1.3. Importância da Gestão Eficiente.....	8
2.1.4. Políticas e Regulamentos na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos.....	9
2.1.5. Métodos de Recolha e Técnicas de Tratamento	10
2.1.6. Desafios na Gestão de Resíduos Sólidos em Áreas Urbanas.....	12
2.1.7. Soluções Tecnológicas para a Gestão de Resíduos Sólidos.....	13
2.1.8. Soluções Inovadoras e Inteligentes	15
2.1.9. Comparação de Tecnologias e sua Aplicabilidade	17

2.2	Internet of Things (IoT) na Gestão de Resíduos Sólidos	20
2.2.1.	Conceito de Internet of Things (IoT).....	20
2.2.2.	Arquitectura de Sistemas IoT	22
2.2.3.	Aplicações da IoT na Gestão de Resíduos Sólidos.....	24
2.2.4.	Benefícios e Desafios do Uso de IoT na Gestão de Resíduos Sólidos.....	25
2.2.5.	Tecnologias e Componentes Usados na Construção do Modelo Físico	27
	Material e Métodos	32
3.2.1.	Metodologia do trabalho científico	32
3.2.2.	Classificação da metodologia	32
3.2.3.	Metodologia de Desenvolvimento do Sistema.....	33
	Resultados e Discussão	37
4.1	Conselho Municipal da Cidade de Maputo.....	37
4.2.1.	Sistema actual de recolha e transporte de RSD no Distrito Urbano de KaMpfumo	40
4.2.2.	Constrangimentos e limitações do sistema actual de recolha e transporte de RSD no Distrito Urbano de KaMpfumo.....	42
4.3.1.	Visão Geral do Sistema.....	47
4.4.1.	Âmbito do Sistema	48
4.4.2.	Grupos de Interesse	49
4.4.3.	Convenções	50
4.4.4.	Requisitos Funcionais	50
4.4.5.	Requisitos Não Funcionais.....	51
4.5.1.	Requisitos de Software.....	52
4.5.2.	Diagrama de casos de USO.....	53
4.5.3.	Diagrama de Classes.....	53
4.5.4.	Diagrama de Sequência de Eventos.....	54
4.5.5.	Diagrama de Estados	55
4.5.6.	Arquitectura do Sistema.....	55
4.5.7.	Modelo de Funcionamento	57

4.6.2.	Arquitetura e Componentes Técnicos da Plataforma Txuna ECO	60
4.6.3.	Integração Técnica com o Sistema IoT.....	61
4.6.4.	Configuração da Plataforma Web Txuna ECO (Django)	61
4.6.5.	Programação do ESP8266 NodeMCU para Integração com a Plataforma Django	63
4.8.1.	Plano de Instalação do Sistema de Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos.....	71
4.8.2.	Plano de Manutenção Preventiva do Sistema de Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos	74
Conclusões e Recomendações		81
6.1	Recomendações.....	83
Referências Bibliográficas		86
Apêndice 1: Guião das Entrevistas		90
Apêndice 2: Relatórios de Observação		91
Apêndice 3: Resumo da Análise Documental.....		92

Lista de Figuras

Figura 1: Evolução Histórica de IoT.....	22
Figura 2: ESP NodeMCU 8266	28
Figura 3: Sensor Ultras-sónico.....	29
Figura 4: LED.....	30
Figura 5: Módulo GSM/GPRS SIM800L.....	31
Figura 6: Contentor de 1,1m ³ e Contentor de 6m ³	42
Figura 7: Visão Geral do Sistema	48
Figura 8: Diagrama de Casos de USO.	53
Figura 9: Diagrama de Classes.	53
Figura 10: Diagrama de Sequência de Eventos.	54
Figura 11: Diagrama de casos de Estados.	55
Figura 12: Arquitectura do modelo de solução.	56
Figura 13: Fluxo de Trabalho.....	59
Figura 14: Protótipo do contentor vazio.	69
Figura 15: Protótipo do contentor cheio.....	70
Figura 16: Alertas de contentor cheio.....	70

Lista de Tabelas

Tabela 1: Comparação de Tecnologias e sua Aplicabilidade.	18
Tabela 2: Especificações e características do NodeMCU ESP8266.	27
Tabela 3: Divisão Administrativa da Cidade de Maputo.	38
Tabela 4: Tipos de Resíduos Sólidos Urbanos.	39
Tabela 5: Resumo das Quantidades de RSU Produzidas Diariamente na Cidade de Maputo.	39
Tabela 6: Requisitos Funcionais.	51
Tabela 7: Requisitos Não Funcionais.	51
Tabela 8: Requisitos de Software.	52
Tabela 9: Plano de Instalação.	71
Tabela 10: Plano de manutenção.	74

Introdução

O objectivo deste capítulo é fornecer uma contextualização abrangente da problemática da gestão de resíduos sólidos urbanos no Distrito Municipal de KaMpfumo, em Maputo, Moçambique, destacando os desafios ambientais, operacionais e socioeconómicos associados à recolha e ao tratamento inadequados dos resíduos. Além disso, o capítulo define o problema enfrentado pelo Conselho Municipal da Cidade de Maputo e apresenta os objectivos gerais e específicos, que incluem o desenvolvimento e avaliação de um Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos baseado na Internet das Coisas (IoT), a revisão e comparação de soluções existentes, a elaboração de um modelo integrado de software e hardware, e o desenvolvimento de um protótipo funcional para testar a viabilidade e o desempenho técnico do sistema proposto.

1.1. Contextualização

A gestão eficaz dos resíduos sólidos constitui um desafio crucial para o desenvolvimento sustentável das áreas urbanas em países em desenvolvimento, como Moçambique. Este desafio transcende questões meramente ambientais, abrangendo também aspectos relacionados com a organização do espaço urbano, a salubridade e a qualidade de vida da população.

De acordo com um relatório do Banco Mundial (Banco Mundial, 2023), Moçambique enfrenta sérios obstáculos na gestão de resíduos sólidos urbanos, com apenas cerca de 50% dos resíduos a serem efectivamente recolhidos e tratados de forma adequada. Esta deficiência contribui directamente para a degradação ambiental e para a deterioração das condições de salubridade urbana, criando contextos potencialmente desfavoráveis ao bem-estar da população (Organização Mundial da Saúde, 2021).

Estudos conduzidos pela Universidade Eduardo Mondlane, Mota e Machado (2021) indicam que a exposição prolongada a resíduos sólidos inadequadamente geridos em Maputo está associada a riscos acrescidos para o ambiente urbano e para a qualidade de vida, especialmente em zonas de elevada densidade populacional. Adicionalmente, a acumulação de resíduos sólidos favorece a proliferação de vectores, como mosquitos e roedores, o que reforça a necessidade de sistemas de gestão mais eficientes e preventivos.

O impacto económico da má gestão de resíduos sólidos também é significativo. Segundo estimativas do Fundo Monetário Internacional (FMI, 2022), os custos anuais associados à gestão inadequada de

resíduos sólidos em Moçambique equivalem a aproximadamente 2% do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Estes custos englobam não apenas as despesas directas com recolha, transporte e disposição final dos resíduos sólidos, mas também custos indirectos relacionados com a degradação ambiental, a pressão sobre os serviços públicos e a perda de produtividade.

Face ao cenário actual, complexo e multifacetado, a necessidade de soluções inovadoras e sustentáveis para a gestão de resíduos sólidos em Maputo torna-se uma questão de elevada relevância. Neste contexto, a implementação de um Sistema de Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos baseado na tecnologia da Internet das Coisas (IoT) surge como uma estratégia promissora para otimizar os processos de monitorização, recolha e planeamento operacional, contribuindo para uma gestão mais eficiente, organizada e sustentável dos resíduos sólidos urbanos.

Contribuições:

- Melhorar a qualidade de vida dos munícipes do Distrito Municipal de KaMpfumo, otimizando a gestão dos resíduos sólidos urbanos, promovendo assim a organização e sustentabilidade do espaço urbano;
- Minimizar os impactos ambientais negativos causados pela deposição inadequada de resíduos sólidos, promovendo um ambiente urbano mais limpo e saudável;
- Reduzir os custos operacionais do Conselho Municipal da Cidade de Maputo relacionados com a gestão de resíduos sólidos, permitindo a realocação de recursos para outras áreas prioritárias;
- Demonstrar o potencial e a eficácia das soluções baseadas em IoT na resolução de problemas sócio-ambientais complexos, incentivando a sua adopção em outras regiões e contextos similares.

Ao alcançar os objectivos e contribuições aqui referidos, este trabalho aspira ser um marco no avanço da gestão de resíduos sólidos urbanos em Moçambique, proporcionando benefícios tangíveis para a população e para o meio ambiente.

1.2. Definição do problema

O Conselho Municipal da Cidade de Maputo enfrenta um desafio significativo no que concerne à gestão dos resíduos sólidos urbanos, com impactos que se estendem para além das preocupações estritamente ambientais, abrangendo aspectos operacionais, organizacionais e socioeconómicos. A recolha e o tratamento ineficazes dos resíduos sólidos contribuem para que apenas cerca de metade destes sejam adequadamente geridos, conforme reportado pelo Banco Mundial. Esta situação reflecte limitações estruturais no sistema actualmente em uso, comprometendo a eficiência da gestão urbana e a qualidade do espaço público.

Importa salientar que, no cenário actual, o sistema de gestão e recolha de resíduos sólidos do município não integra soluções tecnológicas avançadas, sendo predominantemente baseado em processos manuais, planeamento empírico de rotas e ausência de monitorização em tempo real. Esta ausência de suporte tecnológico dificulta o acompanhamento do nível de enchimento dos contentores, a optimização das rotas de recolha e a tomada de decisões informadas, resultando em ineficiências operacionais recorrentes, como contentores sobrelotados, atrasos na recolha e uso pouco eficiente dos recursos disponíveis.

A situação descrita gera impactos negativos no funcionamento global do sistema urbano, agravando os desafios quotidianos enfrentados pelos munícipes de Maputo. A acumulação de resíduos sólidos em áreas urbanas compromete a organização do espaço público e as condições de salubridade urbana, afectando negativamente a percepção de qualidade de vida e o bem-estar da população.

Para além das implicações operacionais e urbanas, a má gestão dos resíduos sólidos acarreta custos económicos relevantes para o município de Maputo e para o país em geral. Segundo estimativas do Fundo Monetário Internacional (FMI, 2022), os custos associados à recolha e deposição final inadequadas dos resíduos sólidos representam uma carga financeira significativa, estimada em cerca de 2% do Produto Interno Bruto (PIB) de Moçambique. Estes custos incluem despesas directas com operações de recolha, transporte e disposição final, bem como custos indirectos relacionados com a degradação ambiental, a pressão sobre os serviços públicos e a redução da eficiência económica.

Face a este contexto, evidencia-se a necessidade de introduzir soluções tecnológicas que apoiem a modernização do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos, permitindo superar as limitações actuais e promover uma gestão mais eficiente, sustentável e orientada por dados no município de Maputo.

A motivação para a realização deste estudo advém da necessidade de encontrar soluções tecnológicas eficientes e sustentáveis para a gestão de resíduos sólidos urbanos, particularmente em contextos urbanos em crescimento, como a Cidade de Maputo. A limitação dos métodos tradicionais de recolha, aliada ao aumento da produção de resíduos, torna essencial a adopção de abordagens inovadoras baseadas em tecnologias emergentes, como a Internet das Coisas (IoT).

O presente estudo está delimitado ao desenvolvimento e avaliação de um sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos baseados em IoT, aplicado ao contexto do Distrito Municipal de KaMpfumo, na Cidade de Maputo. A investigação concentra-se na concepção do modelo, no desenvolvimento de um protótipo funcional e na análise da sua viabilidade técnica. Não se pretende realizar uma avaliação

estatística abrangente do sistema municipal, nem uma análise epidemiológica dos impactos na saúde pública.

O presente trabalho será orientado pela seguinte pergunta de investigação:

“De que forma a implementação de um sistema de gestão de resíduos sólidos baseado na Internet das Coisas (IoT) pode contribuir para a redução dos custos operacionais e para a melhoria da eficiência do Conselho Municipal da Cidade de Maputo, em comparação com o sistema actualmente em uso, apoiando simultaneamente a optimização dos processos de recolha, monitorização e planeamento operacional dos resíduos sólidos urbanos?”

1.3. Objectivos

1.3.1. Objectivo Geral

- ✓ Desenvolver e avaliar a viabilidade de um Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos baseado na Internet das Coisas (IoT), incluindo a concepção de um protótipo funcional e a análise do seu desempenho no contexto do Distrito Municipal de KaMpumo.

1.3.2. Objectivos Específicos

- ✓ Realizar uma revisão bibliográfica sobre o processo de recolha de resíduos sólidos;
- ✓ Pesquisar e comparar soluções de recolha de resíduos sólidos que respondam aos requisitos e especificidades do caso de estudo;
- ✓ Conceber um modelo de sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos, baseado em IoT e adequado ao contexto do Distrito Municipal de KaMpumo;
- ✓ Desenvolver e implementar um protótipo funcional do sistema proposto, integrando sensores, microcontroladores e uma plataforma de monitorização;
- ✓ Avaliar o desempenho e a viabilidade técnica do protótipo desenvolvido, com base em testes experimentais.

O presente trabalho encontra-se estruturado em vários capítulos. O Capítulo 1 apresenta a introdução, incluindo o enquadramento do problema, a motivação, os objectivos e a delimitação do estudo. O Capítulo 2 aborda a revisão de literatura, explorando os conceitos fundamentais e tecnologias associadas à gestão de resíduos sólidos e à Internet das Coisas. O Capítulo 3 descreve a metodologia adoptada no desenvolvimento do estudo. O Capítulo 4 apresenta os resultados, incluindo a análise do sistema actual, o modelo proposto e a validação do protótipo desenvolvido. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações do estudo.

Revisão de Literatura

O objectivo deste capítulo é fornecer uma análise abrangente da literatura existente sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos e a aplicação de tecnologias emergentes, com ênfase na Internet das Coisas (IoT). Esta revisão procura contextualizar a problemática da gestão de resíduos no Distrito Municipal de KaMpfumo, em Maputo, Moçambique, explorando os desafios e as soluções propostas para aumentar a eficiência e a eficácia dos sistemas de recolha e tratamento. Será, adicionalmente, abordada a aplicação da IoT na gestão de resíduos sólidos, destacando as inovações tecnológicas e práticas bem-sucedidas que podem orientar e apoiar o desenvolvimento de um sistema baseado em IoT para o Conselho Municipal da Cidade de Maputo. A revisão inclui uma análise das abordagens tradicionais e modernas, destacando os benefícios e limitações de cada uma, e estabelecendo a base para a proposta de um modelo integrado que visa colmatar as deficiências identificadas na gestão de resíduos sólidos urbanos.

2.1 Gestão de Resíduos Sólidos

2.1.1. Conceitos e Definições

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) engloba um conjunto de actividades que visam o tratamento adequado dos materiais descartados pelos residentes urbanos, desde a sua geração até a deposição final. A importância deste processo é inegável, uma vez que a gestão inadequada dos RSU pode acarretar impactos ambientais significativos e comprometer as condições de salubridade urbana e de organização do espaço público. Conforme destacado por Silva et al. (2021), a gestão eficiente dos RSU é fundamental para a sustentabilidade das cidades, para a preservação dos recursos naturais e para a promoção de sistemas urbanos mais organizados, eficientes e ambientalmente responsáveis.

Os RSU apresentam uma diversidade de características, o que exige um tratamento diferenciado para cada tipo de material. Segundo Ferreira e Costa (2022), a classificação dos resíduos em categorias como orgânicos, recicláveis e perigosos é essencial para a definição de estratégias de gestão adequadas. Os resíduos orgânicos, compostos principalmente por restos de alimentos e materiais de jardinagem, possuem elevado potencial para decomposição e geração de chorume, o que pode contaminar o solo e as águas subterrâneas. Nesse sentido, a compostagem surge como uma alternativa viável para o tratamento de resíduos desta natureza, conforme apontado por Mendes (2023).

A recolha selectiva é uma prática fundamental para a gestão de RSU, pois permite a separação dos materiais recicláveis na fonte geradora, facilitando o processo de reciclagem. Rodrigues e Lima (2023) destacam a importância da recolha selectiva para a redução do volume de resíduos destinados aos aterros sanitários e para a promoção da economia circular. A reciclagem de materiais como papel, plástico, vidro e metal contribui para a conservação de recursos naturais, a redução da poluição e a geração de empregos.

Os resíduos perigosos, devido à sua toxicidade e ao potencial de causar danos significativos ao meio ambiente, requerem cuidados especiais em todas as etapas do seu ciclo de gestão. Almeida (2024) alerta para os riscos associados ao tratamento inadequado deste tipo de resíduos e destaca a necessidade de um tratamento específico para cada categoria de material. Pilhas, baterias, medicamentos e produtos químicos são exemplos de resíduos perigosos que devem ser recolhidos e tratados de forma segura, evitando a contaminação do solo, da água e do ar.

2.1.2. Classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos urbanos podem ser classificados segundo diferentes critérios, sendo os mais comuns a natureza, a origem e a composição dos materiais. Esta classificação constitui um elemento fundamental para o planeamento da recolha, o tratamento adequado, a valorização dos resíduos e a definição de estratégias de gestão mais eficientes e sustentáveis (Silva et al., 2021).

2.1.2.1. Classificação dos resíduos sólidos segundo a natureza

Segundo a sua natureza, os resíduos sólidos urbanos podem ser classificados em orgânicos, recicláveis e perigosos (Almeida, 2024).

- **Resíduos orgânicos:** incluem restos de alimentos, folhas, galhos e outros materiais biodegradáveis que podem ser compostados ou utilizados para a produção de biogás. A compostagem é uma prática sustentável que reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros e gera um produto útil para a agricultura (Ipea, 2021).
- **Resíduos recicláveis:** são aqueles que podem ser reprocessados e transformados em novos produtos, como papel, plástico, vidro e metais. A reciclagem contribui para a conservação de recursos naturais, para a redução do consumo energético e para a mitigação da poluição. Em Maputo, iniciativas de reciclagem têm sido implementadas com o objectivo de elevar a taxa de recuperação de materiais recicláveis e fomentar a economia circular (Green4T, 2022).
- **Resíduos perigosos:** incluem substâncias que representam riscos significativos para o meio ambiente, como produtos químicos, baterias, lâmpadas fluorescentes e resíduos hospitalares. A gestão destes resíduos requer cuidados especiais, incluindo recolha separada, armazenamento seguro e tratamento adequado, a fim de evitar contaminações e acidentes (Academia.edu, 2023).

2.1.2.2. Classificação dos resíduos sólidos segundo a origem

A classificação dos resíduos sólidos segundo a origem permite identificar os principais sectores geradores de resíduos e apoiar a definição de estratégias de recolha e tratamento mais adequadas (Silva et al., 2021).

Os resíduos sólidos podem ser classificados em duas categorias principais com base na sua origem: resíduos gerados em domicílios e resíduos provenientes de actividades comerciais e industriais.

- **Resíduos Domiciliares:** Também designados por resíduos sólidos urbanos, são aqueles gerados pelas residências. Segundo o Ministério da Terra e Ambiente de Moçambique (2016), estes resíduos incluem, geralmente, materiais orgânicos (restos de comida, folhas), recicláveis (papel, plástico, vidro) e resíduos perigosos (pilhas, medicamentos). A gestão adequada destes resíduos é fundamental para reduzir os impactos ambientais e melhorar as condições de salubridade urbana e organização do espaço público.
- **Resíduos Comerciais e Industriais:** são resíduos gerados por actividades comerciais e industriais, abrangendo uma variedade de materiais, como sobras de alimentos de restaurantes, embalagens de produtos e resíduos provenientes de processos produtivos. De acordo com a Associação Moçambicana de Reciclagem (2017), a gestão adequada destes resíduos é indispensável para prevenir a contaminação ambiental e promover a sustentabilidade.

2.1.2.3. Classificação dos resíduos sólidos segundo a composição

A classificação dos resíduos sólidos segundo a composição considera os diferentes materiais que constituem os resíduos, permitindo avaliar o seu potencial de reciclagem, valorização ou tratamento (Silva et al., 2021).

A classificação dos resíduos sólidos com base na sua composição, agrupa-os em quatro categorias principais:

- **Resíduos Orgânicos:** São compostos principalmente por materiais biodegradáveis, como restos de comida, cascas de frutas, folhas e resíduos de jardinagem. Ferreira e Costa (2022) afirmam que a compostagem é uma solução eficaz para o tratamento destes resíduos, transformando-os em adubo e reduzindo a quantidade de material destinado aos aterros.
- **Resíduos Recicláveis:** Incluem materiais que podem ser reprocessados e utilizados na produção de novos produtos, como papel, plástico, vidro e metal. Segundo a Green4T (2022), a reciclagem destes materiais é fundamental para a preservação dos recursos naturais

e para a mitigação da poluição. A implementação de programas de recolha selectiva é uma estratégia essencial para aumentar a taxa de recuperação de materiais recicláveis em Maputo.

- **Resíduos Perigosos:** Estes resíduos contêm substâncias que representam riscos significativos para o meio ambiente e para as condições de salubridade ambiental, como produtos químicos, lâmpadas fluorescentes e resíduos hospitalares. A Academia.edu (2023) destaca a necessidade de um manuseamento adequado e seguro destes resíduos, de forma a prevenir contaminações e acidentes. É essencial que os resíduos perigosos sejam recolhidos e tratados separadamente, garantindo a protecção do meio ambiente e a mitigação de situações de degradação ambiental.
- **Resíduos Inertes:** Compreendem materiais que não se degradam e não apresentam risco para a saúde ou para o meio ambiente, como restos de construção e demolição. Oliveira et al. (2022) apontam que a gestão destes resíduos deve incluir técnicas específicas, como a reciclagem de materiais de construção, que podem ser reaproveitados em novos projectos.

2.1.3. Importância da Gestão Eficiente

A gestão eficiente de resíduos sólidos vai além das questões ambientais, constituindo um pilar essencial para a construção de cidades sustentáveis e resilientes. Oliveira et al. (2022) corroboram esta afirmação ao destacar que uma gestão adequada dos resíduos sólidos contribui significativamente para a mitigação dos impactos ambientais, como a redução da poluição do ar, da água e do solo, além da conservação dos recursos naturais.

A economia circular, um paradigma emergente na gestão de resíduos, apresenta-se como uma alternativa promissora para minimizar o desperdício e otimizar a utilização dos recursos. Costa (2023) enfatiza que a adopção de práticas de economia circular na gestão dos resíduos sólidos promove a transição para um modelo de produção e consumo mais sustentável, no qual os materiais são mantidos em uso por períodos mais longos, reduzindo a necessidade de extração de novos recursos naturais.

Além dos benefícios ambientais, a gestão eficiente dos resíduos sólidos também gera impactos sócio-económicos positivos. Santos e Pires (2023) apontam que a implementação de programas de recolha selectiva e de reciclagem pode estimular a geração de empregos e promover o desenvolvimento de novas tecnologias e negócios relacionados com a gestão de resíduos.

A gestão eficiente dos resíduos sólidos apresenta igualmente implicações relevantes para a organização do espaço urbano e para as condições de salubridade ambiental. Souza (2024) alerta para os riscos potenciais associados ao tratamento inadequado dos resíduos, nomeadamente a proliferação de vectores e a degradação dos ecossistemas urbanos. A deposição final inadequada dos resíduos pode originar lixões a céu aberto, que favorecem a presença de vectores, como ratos e mosquitos, além de

contribuir para a contaminação do solo e das águas subterrâneas, reforçando a necessidade de sistemas de gestão mais eficazes e preventivos.

A inclusão de dados quantitativos sobre os impactos da gestão inadequada dos resíduos sólidos reforça a argumentação relativa à dimensão do problema. Em Moçambique, a quantidade de resíduos gerados por habitante é de aproximadamente 0,64 kg por dia, sendo a taxa de reciclagem inferior a 10%, o que evidencia limitações significativas nos processos de recolha, separação e valorização dos resíduos.

Os custos associados à deposição final inadequada dos resíduos podem atingir milhões de meticais, em virtude da necessidade de intervenções de remediação ambiental, da degradação de infra-estruturas urbanas e do aumento da pressão sobre os serviços públicos, reforçando o impacto económico e operacional da gestão ineficiente dos resíduos sólidos.

A legislação moçambicana sobre a gestão de resíduos sólidos, como a Lei nº 20/97, de 1 de Outubro, e o Regulamento sobre a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos, estabelece directrizes para a gestão adequada dos resíduos. No entanto, a implementação destas políticas enfrenta desafios significativos, como a falta de infra-estrutura e de recursos financeiros.

A importância da participação social na gestão dos resíduos sólidos é crucial. Envolver a comunidade em acções de recolha selectiva, compostagem e outras iniciativas de gestão pode aumentar a eficácia dos programas e promover uma cultura de responsabilidade ambiental. Campanhas de educação e sensibilização são essenciais para mobilizar a população.

A apresentação de casos de sucesso de cidades que implementaram programas eficientes de gestão de resíduos sólidos pode servir como inspiração para outras cidades. Por exemplo, a cidade de Curitiba, no Brasil, é reconhecida mundialmente por seu programa de gestão de resíduos, que inclui a recolha selectiva, a reciclagem e a compostagem, resultando em elevados índices de reciclagem e na redução significativa de resíduos enviados para aterros sanitários.

2.1.4. Políticas e Regulamentos na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos

A implementação de práticas eficientes de gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) depende de um arcaboço legal e normativo sólido e eficaz. As políticas e regulamentos estabelecem directrizes e mecanismos essenciais para assegurar a gestão adequada dos resíduos, incentivando a adopção de práticas mais sustentáveis e a mitigação dos impactos ambientais. Em Moçambique, a legislação ambiental inclui diversas normas e regulamentos que visam garantir a gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos, promovendo tanto a saúde pública como a protecção ambiental (Ministério da Terra e Ambiente, s.d.).

Para fornecer uma base robusta para a gestão integrada de resíduos sólidos, foi desenvolvida a Estratégia de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos. Esta estratégia abrange a minimização da produção, o acondicionamento, a recolha, o transporte, o tratamento e a deposição final dos resíduos. O objectivo é proteger a saúde pública e o ambiente, além de contribuir para a redução da pobreza. A implementação da estratégia requer a colaboração entre diferentes níveis de governo, empresas privadas e a sociedade civil, garantindo uma abordagem holística e sustentável para a gestão de resíduos (Associação Moçambicana de Reciclagem, 2017).

Apesar dos avanços legislativos, a aplicação eficaz das políticas enfrenta diversos desafios. Entre eles estão a falta de recursos financeiros, a ausência de infra-estrutura adequada, a baixa sensibilização da população e a resistência de sectores económicos às mudanças. A efectivação das políticas requer a participação de diversos actores, como governos, empresas, sociedade civil e instituições de investigação, numa abordagem colaborativa e multidisciplinar. Superar estes desafios é crucial para alcançar uma gestão de resíduos mais eficiente e sustentável (Silva et al., 2024).

Adicionalmente, é essencial que as políticas de gestão de resíduos sólidos sejam adaptadas às condições e necessidades específicas de cada região. Silva et al. (2024) salientam que a gestão de resíduos é um desafio complexo que exige soluções personalizadas, tendo em conta aspectos culturais, sociais, económicos e ambientais de cada contexto. A participação activa das comunidades locais na elaboração e implementação das políticas é fundamental para garantir a eficácia e a adesão da população. Adaptar as políticas às realidades locais permite uma gestão mais eficaz e alinhada às necessidades da população (Silva et al., 2024).

2.1.5. Métodos de Recolha e Técnicas de Tratamento

A gestão eficaz dos resíduos sólidos urbanos (RSU) depende de métodos de recolha adequados e técnicas de tratamento apropriadas. A implementação de práticas eficientes é fundamental para reduzir o impacto ambiental e promover a sustentabilidade.

2.1.5.1. Métodos de Recolha

Os métodos de recolha de resíduos sólidos variam de acordo com a estratégia adoptada pelas autoridades locais e o grau de sensibilização da população.

Os principais métodos incluem:

- **Recolha Selectiva:** Consiste na separação dos resíduos recicláveis dos resíduos orgânicos e não recicláveis antes da sua deposição final. Esta prática é essencial para aumentar a taxa de reciclagem e reduzir a quantidade de resíduos destinados aos aterros. Em Maputo, têm sido implementadas diversas campanhas para incentivar a população a separar os resíduos na

origem, facilitando a recolha de materiais como papel, plástico e vidro (Ministério da Terra e Ambiente, 2019).

- **Recolha Porta-a-Porta:** Consiste na recolha directa dos resíduos junto às residências, sendo um método amplamente utilizado em áreas urbanas densamente povoadas. Este sistema proporciona maior conveniência para os moradores e potencia a adesão da população à gestão dos resíduos. Segundo a Agência Nacional de Gestão de Resíduos (ANGR), a recolha porta-a-porta tem sido implementada em alguns bairros de Maputo, contribuindo para a redução da acumulação de resíduos nas vias públicas.
- **Pontos de Recolha:** São locais designados para a deposição de resíduos pela população. Este método é particularmente útil em áreas onde a recolha porta-a-porta não é viável. Em algumas comunidades, são estabelecidos eco-pontos para a deposição de resíduos recicláveis, facilitando a sua gestão (Direcção Nacional de Ambiente, 2021).

2.1.5.2. Técnicas de Tratamento

Após a recolha, os resíduos sólidos devem ser tratados de forma a minimizar os impactos ambientais. As principais técnicas de tratamento incluem:

- **Reciclagem:** Processo que transforma materiais recicláveis em novos produtos, reduzindo a necessidade de matérias-primas e minimizando a quantidade de resíduos. O Instituto Nacional de Estatística de Moçambique (2022) destaca que a implementação de programas de reciclagem em parceria com empresas e cooperativas locais tem sido fundamental para aumentar a eficiência na gestão de resíduos em várias cidades.
- **Compostagem:** Técnica que transforma resíduos orgânicos em composto, um fertilizante natural. Esta prática não apenas reduz a quantidade de resíduos enviados para aterros, mas também proporciona um recurso valioso para a agricultura. A Associação Moçambicana de Agricultura Orgânica (2023) promove a compostagem como uma solução viável para o aproveitamento de resíduos alimentares e de resíduos de jardinagem nas comunidades.
- **Incineração:** Método que envolve a queima de resíduos em altas temperaturas, reduzindo o seu volume e gerando energia. Embora seja uma alternativa que pode contribuir para a gestão de resíduos, deve ser cuidadosamente regulamentada para evitar a emissão de poluentes atmosféricos. A incineração é utilizada em algumas cidades do mundo, mas ainda é um tema de debate em Moçambique, onde as preocupações ambientais são prevalentes (Ministério da Saúde, 2022).
- **Aterros Sanitários:** Locais de deposição final de resíduos, projectados para minimizar os impactos ambientais. Em Moçambique, a construção de aterros sanitários adequados é uma

prioridade para garantir a gestão segura dos resíduos. A Direcção Nacional de Gestão de Resíduos tem promovido a construção de aterros controlados que atendem às normas ambientais, reduzindo assim os riscos de contaminação do solo e das águas subterrâneas (Ministério da Terra e Ambiente, 2021).

2.1.6. Desafios na Gestão de Resíduos Sólidos em Áreas Urbanas

A gestão de resíduos sólidos em áreas urbanas em Moçambique enfrenta diversos desafios que comprometem a eficácia das estratégias implementadas e afectam negativamente o meio ambiente, a organização do espaço urbano e as condições de salubridade ambiental. Os principais desafios incluem:

2.1.6.1. Desafios Logísticos e Operacionais

A logística da recolha e do tratamento de resíduos sólidos é um dos principais obstáculos nas áreas urbanas. Entre os desafios operacionais, destacam-se:

- **Infra-estrutura Insuficiente:** Muitas cidades carecem de uma infra-estrutura adequada para a recolha, transporte e tratamento de resíduos. Este cenário inclui a falta de veículos apropriados e a escassez de locais adequados para a deposição final dos resíduos (Direcção Nacional de Gestão de Resíduos, 2021).
- **Crescimento Populacional Rápido:** O aumento populacional em áreas urbanas resulta numa maior geração de resíduos, exigindo que os sistemas de gestão se adaptem rapidamente. A falta de planeamento urbano e a expansão descontrolada de assentamentos informais dificultam a implementação de sistemas eficientes de recolha e tratamento (Ministério da Terra e Ambiente, 2022).
- **Capacitação de Recursos Humanos:** A escassez de profissionais qualificados na área de gestão de resíduos constitui também um desafio. É necessário promover formação e sensibilizar a comunidade sobre práticas adequadas para melhorar a eficácia dos sistemas implementados (Instituto Nacional de Estatística de Moçambique, 2022).

2.1.6.2. Impactos Ambientais e de Saúde Pública

A má gestão dos resíduos sólidos tem consequências relevantes no meio ambiente e nas condições de salubridade urbana, incluindo:

- **Contaminação do Solo e das Águas:** A deposição inadequada de resíduos pode levar à contaminação do solo e das fontes de água, afectando a qualidade da água potável e prejudicando ecossistemas locais (Agência Nacional de Gestão de Resíduos, 2019).
- **Riscos associados à acumulação de resíduos:** O acumular de resíduos em áreas urbanas favorece a proliferação de vectores, como mosquitos e roedores, criando contextos

potencialmente desfavoráveis à salubridade ambiental, especialmente em comunidades vulneráveis (Ministério da Saúde, 2023).

- **Poluição do Ar:** A incineração inadequada de resíduos ou a decomposição de resíduos orgânicos nos aterros gera emissões de gases nocivos, que afectam a qualidade do ar e podem causar problemas respiratórios à população (Direcção Nacional de Ambiente, 2021).

2.1.6.3. Desafios Económicos e Financeiros

Os desafios económicos e financeiros também têm um impacto significativo na gestão de resíduos sólidos:

- **Falta de Financiamento:** A escassez de recursos financeiros para a implementação de sistemas eficientes de gestão de resíduos é um obstáculo persistente. A dependência de subsídios governamentais e a falta de investimento privado dificultam a modernização das infra-estruturas e a adopção de tecnologias mais eficientes (Banco Mundial, 2022).
- **Custos de Operação Elevados:** Os custos associados à recolha, ao transporte e ao tratamento de resíduos são frequentemente elevados, tornando difícil para as autoridades locais manterem serviços adequados. Adicionalmente, a ausência de tarifas justas para a gestão de resíduos pode resultar em receitas insuficientes para sustentar os serviços (Ministério da Administração Estatal e Função Pública, 2021).
- **Educação e Sensibilização:** Investir na educação da população sobre a gestão de resíduos e sobre a importância da recolha selectiva requer recursos financeiros. A falta de campanhas eficazes pode limitar a participação da comunidade nas iniciativas de gestão de resíduos, comprometendo os resultados das políticas implementadas (Associação Moçambicana de Gestão de Resíduos, 2023).

A superação destes desafios é essencial para garantir uma gestão sustentável dos resíduos sólidos nas áreas urbanas de Moçambique, protegendo a saúde pública e promovendo a conservação ambiental.

2.1.7. Soluções Tecnológicas para a Gestão de Resíduos Sólidos

2.1.7.1. Descrição de tecnologias tradicionais

A nível global, a gestão de resíduos sólidos tem evoluído para integrar tecnologias mais avançadas, com o objectivo de reduzir o impacto ambiental e maximizar a reutilização de materiais. Nos países desenvolvidos, é comum o uso de soluções como a reciclagem automatizada, a incineração com recuperação de energia e os digestores anaeróbicos.

A reciclagem automatizada envolve a separação mecânica de materiais recicláveis, como metais, plásticos e papéis, utilizando sensores ópticos e infravermelhos. Por sua vez, a incineração com recuperação de energia possibilita a queima controlada de resíduos para gerar electricidade ou calor,

reduzindo o volume de resíduos enviados para os aterros sanitários (Singh e Sharma, 2022). Outras inovações importantes incluem o uso de plataformas digitais e da Internet das Coisas (IoT) para monitorizar o processo de recolha e deposição de resíduos, tornando-o mais eficiente e transparente (van der Werf, 2023).

Contudo, apesar da implementação destas tecnologias, persistem desafios globais, especialmente no que respeita à gestão de resíduos plásticos, que continuam a acumular-se nos oceanos e aterros, causando sérios danos ao ambiente e à vida marinha.

Em África, a gestão de resíduos sólidos continua a ser um desafio devido à urbanização acelerada, à falta de infra-estruturas adequadas e à ausência de políticas públicas eficazes. Muitos países ainda dependem de aterros controlados ou lixões a céu aberto para a deposição dos resíduos. Em vários casos, tais aterros são mal geridos e a prática da reciclagem encontra-se em estágios iniciais, enfrentando barreiras como a falta de sensibilização e a escassez de recursos financeiros e de infra-estruturas adequadas.

Ainda assim, algumas tecnologias começam a ser adoptadas em diversas partes do continente. O uso de plataformas digitais para facilitar a recolha de resíduos está a ganhar espaço, permitindo que os cidadãos comuniquem directamente com as empresas responsáveis pela recolha. Em países como a África do Sul, foram implementados sistemas de triagem de resíduos e centros de reciclagem comunitários, que incentivam a separação dos resíduos a nível doméstico (Nkosi, 2021). Por sua vez, o Quénia tem explorado o uso de tecnologias de biogás para converter resíduos orgânicos em energia (Mwangi, 2022).

Em Moçambique, a gestão de resíduos sólidos ainda é amplamente baseada em tecnologias convencionais. Nas áreas urbanas, como Maputo, o sistema de recolha de resíduos depende de contentores distribuídos pelos bairros, onde os residentes depositam os resíduos. Empresas contratadas são responsáveis pela recolha dos contentores, transportando os resíduos para os aterros, como os aterros de Hulene e de Malhazine. No entanto, estes aterros enfrentam graves problemas de gestão. O aterro de Hulene, em particular, funciona como um lixão a céu aberto, onde os resíduos são depositados sem tratamento ou controlo, expondo as populações vizinhas a riscos significativos para a saúde e para o ambiente. Estudos recentes apontam a presença de elementos químicos perigosos, como chumbo e mercúrio, no solo e nas águas subterrâneas da área, afectando directamente as comunidades locais (Agência de Informação de Moçambique, 2024).

O sistema de recolha de resíduos também enfrenta desafios logísticos significativos, associados a intervalos ineficientes entre a recolha dos contentores e a deposição final nos aterros, o que resulta em contentores frequentemente sobrelotados e na acumulação de resíduos sólidos nas vias públicas. Esta

acumulação agrava os problemas de saneamento urbano e compromete as condições de salubridade ambiental, além de dificultar o espaço público. Por outro lado, as iniciativas de reciclagem são escassas, com a maior parte dos resíduos recicláveis a ser misturada com resíduos orgânicos, dificultando os esforços de reutilização e reciclagem (Mabote, 2020).

Apesar destas limitações, Moçambique tem começado a explorar o uso de tecnologias emergentes. Algumas cidades experimentam o uso de aplicações móveis, que permitem aos cidadãos solicitar a recolha de resíduos, e o uso de sensores IoT para monitorizar o nível de enchimento dos contentores e optimizar as rotas dos veículos de recolha (Ferreira e Amaral, 2021). No entanto, estas iniciativas ainda se encontram em fase piloto e carecem de maior investimento e apoio governamental.

2.1.7.2. Limitações das tecnologias convencionais

As tecnologias convencionais de gestão de resíduos, como o uso de contentores e aterros sanitários, apresentam diversas limitações no contexto moçambicano. A falta de tratamento adequado dos resíduos nos aterros pode resultar na contaminação do solo e das águas subterrâneas, comprometendo a qualidade ambiental e as condições de salubridade do meio envolvente. Adicionalmente, a sobrelocação dos contentores em áreas residenciais reflecte a existência de uma infra-estrutura de recolha de resíduos sólidos que necessita de melhorias consideráveis, tanto ao nível do planeamento operacional como da capacidade de resposta do sistema (Pinto e Carvalho, 2022).

Por sua vez, a inexistência de um sistema eficaz de separação de resíduos e a infra-estrutura limitada para a reciclagem reduzem as oportunidades de reaproveitamento de materiais. A sensibilização pública sobre práticas de deposição sustentável também é baixa, o que agrava a situação. Para ultrapassar estes desafios, é essencial que Moçambique invista em soluções tecnológicas mais avançadas, como a automação dos processos de recolha e a adopção de sistemas de tratamento de resíduos mais sofisticados, incluindo incineradores controlados e unidades de biogás (Nkosi, 2021).

2.1.8. Soluções Inovadoras e Inteligentes

2.1.8.1. Tecnologias emergentes na gestão de resíduos

As tecnologias emergentes têm desempenhado um papel fundamental na modernização e na eficiência da gestão de resíduos sólidos, especialmente em países que enfrentam desafios relacionados com infra-estruturas e recursos limitados. Estas inovações permitem uma abordagem mais sustentável, automatizada e integrada, melhorando a recolha, a reciclagem e o tratamento de resíduos sólidos.

Uma das tecnologias mais promissoras é a Internet das Coisas (IoT), que possibilita a ligação de dispositivos físicos à internet, permitindo a monitorização em tempo real e a automação de processos. No contexto da gestão de resíduos, a IoT pode ser utilizada para monitorizar o enchimento de

contentores, a localização dos veículos de recolha e a eficiência dos serviços de limpeza urbana. Além disso, a tecnologia blockchain está a ser explorada para melhorar a rastreabilidade dos resíduos, permitindo a auditoria e o acompanhamento do destino dos materiais recolhidos (Garía et al., 2022).

Outro exemplo relevante é o uso de drones para o mapeamento de aterros sanitários e a monitorização de áreas urbanas onde o depósito ilegal de resíduos é recorrente. Estes drones, equipados com câmaras e sensores de alta-definição, permitem identificar pontos críticos de acumulação de resíduos sólidos, facilitando intervenções mais rápidas e eficientes por parte das autoridades (van der Werf, 2023).

2.1.8.2. Uso de sensores, big data e inteligência artificial

O uso de sensores tem-se revelado uma solução eficaz para melhorar a gestão de resíduos em áreas urbanas e rurais. Sensores instalados em contentores permitem monitorizar em tempo real o nível de enchimento, possibilitando uma recolha mais eficiente e optimizada. Cidades como Barcelona e Amsterdão já implementaram sistemas baseados em IoT, que utilizam sensores para optimizar a recolha de resíduos, reduzindo significativamente os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa, uma vez que os veículos de recolha seguem rotas mais curtas e precisas (Ferreira e Amaral, 2021).

A Big Data é outra tecnologia emergente que tem sido utilizada para transformar a gestão de resíduos. Ao recolher grandes volumes de dados gerados pelos sensores, aplicações móveis e sistemas de rastreio, as cidades e empresas competentes podem analisar padrões de produção de resíduos sólidos, prever picos de geração e identificar áreas que necessitam de maior atenção. A análise de Big Data oferece uma visão detalhada que permite a tomada de decisões baseada em dados mais precisos e eficazes, optimização simultânea dos recursos humanos e materiais (Singh e Sharma, 2022).

Por sua vez, a Inteligência Artificial (IA) está a ser cada vez mais aplicada no processo de triagem de resíduos. O uso de robôs inteligentes equipados com IA permite automatizar a separação de resíduos recicláveis, aumentando a eficiência e reduzindo o erro humano. Estes sistemas utilizam visão computacional para identificar e classificar diferentes tipos de materiais, como plásticos, metais, papel e vidro, com uma precisão muito superior à dos processos manuais tradicionais (Nkosi, 2021). Além disso, a IA pode ser utilizada para prever padrões de geração de resíduos com base em dados históricos, ajudando as autoridades a ajustar as suas políticas de gestão de forma mais proactiva e eficiente.

2.1.8.3. Exemplos de Inovações em África e Moçambique

Em África, algumas cidades estão a adoptar soluções inovadoras, embora em menor escala quando comparadas com os países desenvolvidos. No Quénia, por exemplo, está a ser testada a aplicação de tecnologias de biogás para transformar resíduos orgânicos em energia, uma solução particularmente eficaz em áreas rurais onde o acesso à electricidade é limitado. Em Ruanda, a capital Kigali adoptou um

sistema digital de recolha de resíduos que permite aos cidadãos agendar a recolha via SMS ou aplicação móvel, facilitando a comunicação entre os moradores e as empresas de limpeza (Mwangi, 2022).

Em Moçambique, a aplicação destas tecnologias emergentes ainda se encontra numa fase embrionária. No entanto, a crescente urbanização e o aumento dos problemas relacionados com a gestão de resíduos têm impulsionado o interesse em soluções tecnológicas inovadoras. Algumas cidades começaram a experimentar o uso de sensores de IoT para monitorizar os níveis de enchimento de contentores em áreas urbanas densamente povoadas, como Maputo, numa tentativa de melhorar a eficiência da recolha e reduzir a acumulação de resíduos nas ruas. Por outro lado, o uso de aplicações móveis para solicitar a recolha de resíduos tem sido testado em comunidades urbanas, permitindo uma melhor coordenação entre os residentes e as empresas responsáveis pela gestão de resíduos (Mabote, 2020).

Apesar das dificuldades económicas e infra-estruturais, Moçambique possui um grande potencial para o desenvolvimento e implementação de soluções tecnológicas inovadoras, especialmente no que respeita à integração de tecnologias sustentáveis que aproveitem recursos locais e promovam uma gestão mais eficiente dos resíduos.

2.1.9. Comparação de Tecnologias e sua Aplicabilidade

2.1.9.1. Análise comparativa de diferentes tecnologias

A gestão de resíduos sólidos nos bairros de Moçambique constitui uma das maiores preocupações das autoridades locais, especialmente nas áreas urbanas e suburbanas, onde a recolha e o tratamento enfrentam desafios significativos. Entre os métodos tradicionais utilizados, destaca-se a recolha em contentores comunitários, prática comum em muitos bairros de Maputo e noutras cidades moçambicanas. Os contentores são colocados em pontos estratégicos e o seu conteúdo é recolhido regularmente por empresas de gestão de resíduos, como a empresa municipal ou prestadores de serviços privados. Embora este método seja amplamente adoptado, apresenta várias limitações, com destaque para a falta de regularidade na recolha, o que resulta na acumulação de resíduos nas vias públicas, comprometendo a organização do espaço urbano, a eficiência do sistema de recolha e as condições de salubridade ambiental (Firme e Chilundo, 2020).

Comparando com outras tecnologias de gestão de resíduos, como aterros sanitários e incineração, a recolha em contentores é uma solução de baixo custo, mas menos eficiente em áreas densamente povoadas e com elevada geração de resíduos. Os aterros sanitários, como o de Hulene, continuam sendo o principal destino dos resíduos recolhidos nos bairros, mas as consequências ambientais são graves, devido à falta de tratamento adequado dos resíduos e dos lixiviados, bem como à emissão de gases tóxicos (Chavane, 2022).

Por outro lado, a incineração e a implementação de sistemas mais sofisticados, como plataformas de triagem automatizada, são práticas que têm encontrado aplicação em contextos mais desenvolvidos, mas que se revelam inviáveis economicamente e inadequadas para os bairros periféricos de Moçambique, que carecem de infra-estrutura adequada e capacidade técnica para a sua implementação. No entanto, algumas cidades africanas têm experimentado soluções inovadoras, como mini-estações de reciclagem em bairros e o uso de cooperativas de catadores para complementar a recolha tradicional, o que tem mostrado bons resultados na redução da quantidade de resíduos depositados em aterros e na promoção da inclusão social (Silva e Mahler, 2021).

A Tabela de Comparação de Tecnologias e sua Aplicabilidade, apresentada a seguir, tem como objectivo fornecer uma visão clara e objectiva sobre as diferentes tecnologias utilizadas na gestão de resíduos sólidos, com foco na sua aplicabilidade nos bairros periféricos de Moçambique. A análise considera as vantagens e desvantagens de cada solução, destacando os principais desafios e o potencial de implementação em contextos de infra-estrutura limitada, como é o caso de muitas áreas urbanas e suburbanas moçambicanas. Esta abordagem comparativa facilita a identificação de soluções mais adequadas para melhorar a eficiência da gestão de resíduos nos bairros, tendo em conta tanto as necessidades locais como os recursos disponíveis.

Tabela 1: Comparação de Tecnologias e sua Aplicabilidade

Fonte: Santos et al. (2023); Almeida e Matos (2022); Agência de Informação de Moçambique (2024)

<i>Tecnologia</i>	<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>	<i>Aplicabilidade</i>
<i>Recolha Tradicional com Contentores</i>	Baixo custo; Familiaridade da população; Facilidade de implementação.	Acumulação de resíduos devido à irregularidade na recolha; Poluição visual e olfactiva; Não incentiva reciclagem.	Alta aplicabilidade; Solução amplamente utilizada, mas com necessidade de melhoria na frequência da recolha.
<i>Aterros Sanitários</i>	Capacidade para grandes volumes de resíduos; Método tradicional para deposição final.	Emissão de gases tóxicos; Contaminação do solo e das águas subterrâneas; Necessidade de áreas vastas e afastadas das zonas residenciais.	Aplicável, mas limitada pelo impacto ambiental e pela falta de tratamento adequado de resíduos perigosos.
<i>Incineração</i>	Redução significativa de volume de resíduos; Produção de energia através de incineração.	Elevado custo; Emissão de gases poluentes; Infra-estrutura dispendiosa e complexa de operar.	Baixa aplicabilidade devido ao custo elevado e à falta de infra-estrutura nos bairros.
<i>Reciclagem e Cooperativas de</i>	Incentivo à economia circular; Geração de	Exige separação na origem; Depende de	Média aplicabilidade; possível em bairros

<i>Catadores</i>	empregos; Redução da quantidade de resíduos enviados para aterros.	sensibilização e participação activa; Custos de implementação e operação.	com forte mobilização comunitária, mas requer suporte logístico e infra-estrutura.
<i>Sensores IoT e Big Data para Monitorização de Contentores</i>	Optimização das rotas de recolha; Redução dos custos operacionais; Mitigação da acumulação de resíduos nos contentores.	Requer conectividade e infra-estrutura de rede; Custo inicial elevado para aquisição e implementação.	Baixa a média aplicabilidade; potencial futuro em áreas urbanas com maior conectividade, mas ainda limitada nos bairros periféricos.
<i>Compostagem de Resíduos Orgânicos</i>	Reduz o volume dos resíduos enviados aos aterros; produz fertilizantes naturais; baixo custo operacional.	Requer separação rigorosa de resíduos orgânicos; exige espaço e conhecimento técnico.	Alta aplicabilidade em bairros periféricos; pode ser implementada em pequena escala com envolvimento comunitário.

2.1.9.2. Avaliação da aplicabilidade em contextos específicos

A recolha de resíduos sólidos nos bairros de Moçambique, como é o caso dos bairros de Maputo, é frequentemente realizada de forma irregular, o que agrava significativamente os desafios associados à gestão de resíduos. Em contextos onde há falta de recursos para a implementação de tecnologias mais avançadas, as soluções baseadas na participação comunitária e no fortalecimento da logística de recolha têm-se revelado mais eficazes. Por exemplo, a organização de grupos locais para efectuar a separação de resíduos na origem e a criação de esquemas de compostagem para os resíduos orgânicos são práticas que já foram testadas com algum sucesso em pequenas comunidades e que apresentam potencial para expansão (Ferreira e Ntumbane, 2021).

Em bairros periféricos, a implementação de sistemas de monitorização com sensores IoT para verificar o nível de enchimento dos contentores tem sido considerada uma solução inovadora. Esta tecnologia permite otimizar as rotas de recolha e reduzir o tempo de resposta das empresas de gestão de resíduos, mas ainda se encontra em fase experimental em algumas cidades africanas e pode enfrentar barreiras devido à falta de conectividade e de infra-estrutura nos bairros moçambicanos (Singh e Ngobe, 2019).

A comparação entre estas tecnologias deve, portanto, considerar o contexto económico e social de Moçambique, onde a realidade dos bairros urbanos e suburbanos exige soluções de baixo custo, porém eficientes. A combinação de iniciativas comunitárias, parcerias público-privadas e a introdução gradual de tecnologias emergentes, como sensores e sistemas de big data para monitorizar a recolha, oferece uma abordagem equilibrada para melhorar a gestão de resíduos sólidos nos bairros.

2.2 Internet of Things (IoT) na Gestão de Resíduos Sólidos

2.2.1. Conceito de Internet of Things (IoT)

2.2.1.1. Definição e princípios básicos da IoT

A Internet das Coisas (IoT) refere-se à interconexão digital de objectos físicos e dispositivos através da internet, permitindo a troca de dados e a comunicação em tempo real entre sistemas automatizados. O conceito de IoT baseia-se na integração de sensores, actuadores e redes de comunicação, que, em conjunto, recolhem e transmitem informações para uma plataforma centralizada, facilitando a monitorização, o controlo e a tomada de decisões automatizadas (Atzori et al., 2010).

Os princípios básicos da IoT incluem:

- Capacidade de detecção e monitorização, permitindo que os dispositivos meçam condições específicas do ambiente (por exemplo, níveis de enchimento de contentores).
- Conectividade, possibilitando a comunicação entre dispositivos e sistemas centrais de gestão.
- Análise de dados, desempenhando um papel fundamental, dado que as informações recolhidas pelos dispositivos são processadas por sistemas de inteligência artificial (IA) ou Big Data para otimizar operações e identificar tendências ou padrões de comportamento.

A evolução da IoT ganhou destaque com a miniaturização de sensores e a expansão das redes de comunicação móvel, factores que permitiram a interligação de uma vasta gama de dispositivos. Com o crescimento exponencial do uso de *smartphones* e dispositivos interligados, a IoT foi rapidamente incorporada em várias indústrias, incluindo a gestão de resíduos sólidos. Actualmente, as soluções baseadas em IoT estão orientadas para a eficiência, a sustentabilidade e a automação dos processos urbanos, sendo a recolha inteligente de resíduos um dos principais exemplos (Gubbi et al., 2013).

A tendência futura da IoT é a integração com outras tecnologias emergentes, como Inteligência Artificial (IA), *Big Data*, e 5G, permitindo maior precisão na gestão de dados e na comunicação entre dispositivos. No contexto da gestão de resíduos sólidos, esta integração aponta para um futuro com maior automação, eficiência na recolha e redução dos impactos ambientais através de soluções inteligentes (Kumar et al., 2020).

2.2.1.2. Evolução e tendências da IoT

A história da Internet das Coisas (IoT) remonta a períodos anteriores à própria Internet, tendo as suas raízes na tecnologia RFID (Radio Frequency Identification), actualmente utilizada em inúmeras etiquetas de identificação de produtos, como caixas e roupas. A tecnologia RFID foi empregue durante

a Segunda Guerra Mundial para identificar se um avião detectado pelo radar era aliado ou inimigo. Após a guerra, surgiram aplicações comerciais, como sistemas para evitar furtos em lojas, baseados em etiquetas RFID com respostas simples de 1 bit, que respondiam a um sinal de determinada frequência com “0” ou “1” (Filho, 2016).

Em 1973, o empreendedor californiano Charles Walton desenvolveu um sistema de controlo de acesso sem chaves, baseado em rádio frequência. O sistema funcionava com um cartão contendo um transponder que, ao aproximar-se de uma porta equipada com RFID, verificava a identidade do utilizador e desbloqueava a porta.

Durante a década de 1970, no Los Alamos National Laboratory, o governo norte-americano desenvolveu pesquisas para criar identificadores de equipamentos militares e apoiar a logística de transporte e armazenamento, especialmente de armas nucleares. Foram concebidos sistemas de RFID para utilização em portões e camiões de transporte, com transponders que continham identificações dos produtos e outras informações.

Em 1999, no Massachusetts Institute of Technology (MIT) foi criado o Auto-ID Center, posteriormente denominado Auto-ID Labs, com o apoio da Uniform Code Council, EAN International, Protector & Gamble e Gillette. Dois professores, David Brok e Sanjay Sarma, trabalhavam no centro com objectivo de obter etiquetas de RFID com microprocessadores de baixo custo.

Em 2002, na revista Forbes, o pesquisador do Auto-ID Center, Kevin Ashton, utilizou pela primeira vez a expressão “Internet das coisas” (Filho, 2016).

Em 2008, realizou-se em Zurique, Suíça, a primeira Conferência Internacional sobre IoT, onde foram discutidos temas como RFID, monitorização, aspectos de negócios e tecnologias de conectividade e conversão de protocolos.

De acordo com (Santos et al., n.d.) alguns autores consideram que a IoT será a nova revolução da tecnologia da informação. Assim, a IoT não deve ser entendida como um fim, mas como um meio para alcançar avanços mais amplos, como a computação ubíqua. A figura seguinte apresenta a evolução histórica da IoT, desde o seu surgimento, adopção, maturidade e impacto das diversas tecnologias associadas.

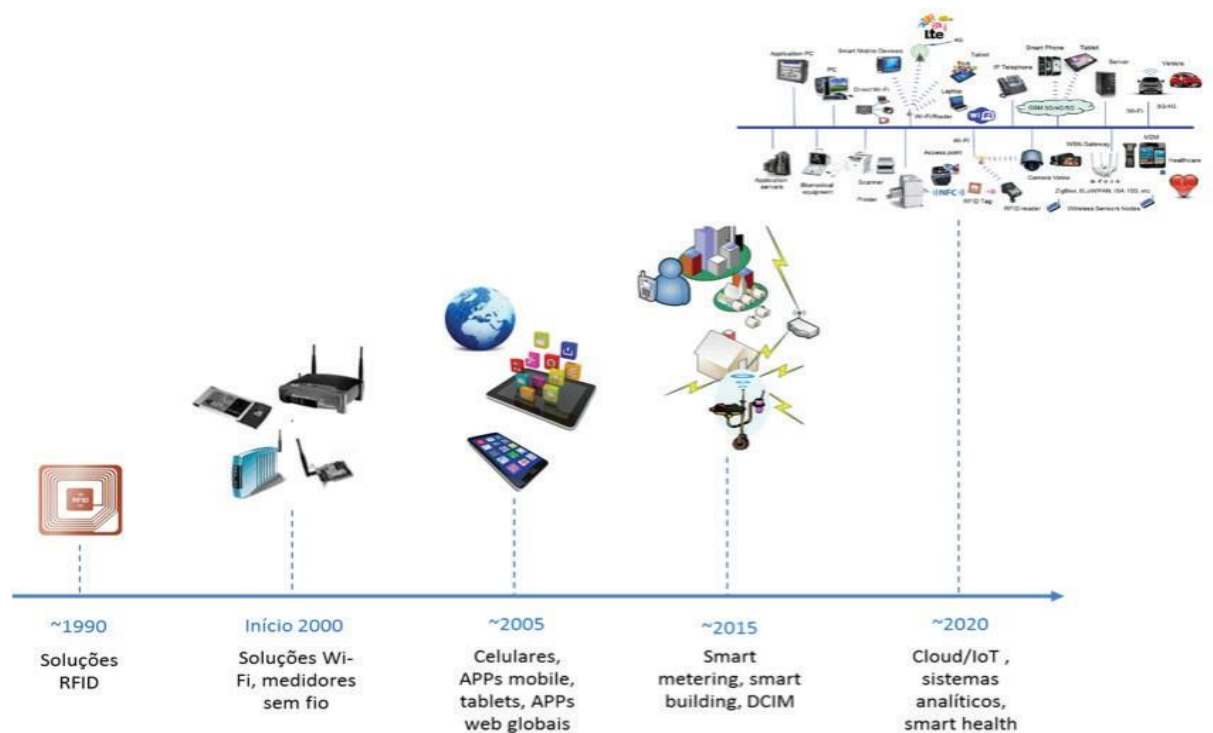


Figura 1: Evolução Histórica de IoT

Fonte: (Filho, 2016)

2.2.2. Arquitectura de Sistemas IoT

A arquitectura de um sistema de Internet das Coisas (IoT) é composta por vários elementos que trabalham de forma integrada para recolher, transmitir, processar e analisar dados em tempo real. Na gestão de resíduos sólidos, esta arquitectura permite uma recolha mais eficiente de dados, optimizando as operações e reduzindo desperdícios. A seguir, descrevem-se os principais componentes de um sistema IoT:

- **Sensores:** Dispositivos essenciais para monitorizar o ambiente físico. No contexto da gestão de resíduos, os sensores podem medir o nível de enchimento dos contentores, detectar odores ou medir a temperatura. Estes dados são posteriormente transmitidos para outros componentes do sistema (Agarwal et al., 2021).
- **Dispositivos e Actuadores:** Executam acções com base em comandos recebidos. Por exemplo, podem abrir ou fechar um contentor quando detectam que está cheio, facilitando a recolha automatizada. Estes dispositivos comunicam com a rede e com o sistema central (Baretha e Bharathi, 2020).
- **Redes de Comunicação:** A comunicação entre sensores, dispositivos e o centro de processamento é feita através de redes. Em sistemas IoT, tecnologias como Wi-Fi, NB-IoT ou LoRaWAN são utilizadas pela sua capacidade de cobrir grandes áreas urbanas e

pelo baixo consumo de energia, garantindo uma comunicação eficaz e em tempo real (Rao e Solanki, 2021).

- **Plataformas de Processamento e Análise de Dados:** Os dados recolhidos pelos sensores são enviados para plataformas que processam e analisam a informação. Tecnologias como *Big Data* e Inteligência Artificial (IA) são utilizadas para analisar grandes volumes de dados e gerar informações úteis. No caso da gestão de resíduos, esta análise permite prever quando um contentor estará cheio e definir as melhores rotas de recolha (Kamble et al., 2019).
- **Interface de Utilizador (UI):** É a forma como os gestores e operadores interagem com o sistema IoT. Através de painéis de controlo ou aplicações móveis, é possível monitorizar o estado dos contentores, gerar relatórios e tomar decisões com base em dados em tempo real (Zhang et al., 2017).

2.2.2.1. Modelos arquitectónicos

Existem diferentes modelos arquitectónicos que descrevem a estrutura de um sistema IoT. Entre os mais utilizados destacam-se:

- a) **Modelo de Três Camadas:** Este modelo básico divide a arquitectura em três níveis:
 - **Camada de Percepção:** Inclui os sensores e dispositivos que recolhem dados do ambiente.
 - **Camada de Rede:** Responsável pela transmissão dos dados para os servidores centrais.
 - **Camada de Aplicação:** Onde os dados são processados e transformados em informações úteis para os utilizadores (Wang et al., 2020).
- b) **Modelo de Cinco Camadas:** Este modelo é mais detalhado e inclui duas camadas adicionais:
 - **Camada de Percepção:** Inclui os sensores e dispositivos que recolhem dados do ambiente.
 - **Camada de Transporte:** Gere o envio de dados entre os diferentes sistemas.
 - **Camada de Processamento:** Onde são analisados os dados, muitas vezes em servidores na nuvem.
 - **Camada de Aplicação:** Onde os dados são processados e transformados em informações úteis para os utilizadores.
 - **Camada de Negócios:** Define as regras e políticas de operação, permitindo a geração de relatórios avançados (Liu et al., 2019).

Estes modelos garantem que os sistemas IoT sejam flexíveis, eficientes e escaláveis, permitindo a sua adaptação a diferentes contextos, como a gestão de resíduos sólidos em bairros ou cidades.

2.2.3. Aplicações da IoT na Gestão de Resíduos Sólidos

A utilização da Internet das Coisas (IoT) na gestão de resíduos sólidos tem-se tornado cada vez mais comum, especialmente no contexto das cidades inteligentes. A IoT oferece soluções inovadoras para enfrentar desafios como o aumento da geração de resíduos, a eficiência das operações de recolha e a promoção da sustentabilidade ambiental. A seguir, apresentam-se alguns casos de uso e os benefícios específicos da aplicação de IoT na gestão de resíduos sólidos.

Nas cidades inteligentes, os sistemas IoT transformam a forma como os resíduos são geridos, permitindo operações mais eficientes e menos onerosas. Um exemplo notável é o uso de contentores inteligentes, equipados com sensores de nível de enchimento. Estes sensores monitorizam continuamente o volume de resíduos nos contentores e enviam os dados para uma central de controlo. Sistemas similares já foram implementados em Barcelona, Espanha, onde a gestão eficiente dos resíduos foi otimizada, reduzindo significativamente os custos operacionais (Montero et al., 2019).

Outro exemplo é a implementação de contentores inteligentes na cidade de Copenhaga, Dinamarca, que utilizam sensores IoT para medir não só o nível de enchimento, mas também parâmetros como a temperatura e os odores. Esta tecnologia tem contribuído para a melhoria das condições de salubridade urbana e para a redução de ocorrências operacionais indesejáveis, como incêndios em contentores. Estas soluções permitem que as operações de recolha sejam planeadas de forma dinâmica, com base nas necessidades reais de cada local, otimizando os recursos disponíveis e aumentando a eficiência do sistema (Jagustovic et al., 2021).

A implementação de IoT na gestão de resíduos sólidos oferece uma série de benefícios que melhoram a eficiência e a sustentabilidade do processo:

- **Optimização de Rotas:** Através da monitorização em tempo real dos níveis de enchimento dos contentores, as empresas responsáveis pela recolha podem otimizar as rotas dos camiões, reduzindo o número de viagens desnecessárias, economizando combustível e diminuindo as emissões de carbono. Estudos indicam que esta optimização pode reduzir até 30% dos custos operacionais (Khan et al., 2020).
- **Monitorização em Tempo Real:** Um dos maiores benefícios da IoT é a capacidade de monitorizar os contentores em tempo real. Os dados recolhidos pelos sensores são enviados para uma plataforma central, onde podem ser visualizados por operadores e

gestores, permitindo uma resposta rápida a situações críticas, como contentores cheios, odores fortes ou riscos de incêndio (Yang et al., 2018).

- **Sustentabilidade e Redução de Impacto Ambiental:** Ao melhorar a eficiência da recolha e reduzir o número de viagens desnecessárias, a IoT contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a monitorização de odores e substâncias perigosas ajuda a prevenir situações que possam prejudicar o meio ambiente (Sharma e Singh, 2021).
- **Análise Preditiva:** Com a análise dos dados recolhidos pelos sensores IoT, é possível prever quando um contentor atingirá a capacidade máxima, permitindo um agendamento mais preciso e preventivo das operações de recolha. Esta abordagem evita sobrelotação e garante maior eficiência (Gupta e Shah, 2020).
- **Maior Transparência e Responsabilidade:** A integração da IoT com plataformas de *Big Data* e Inteligência Artificial (AI) facilita a criação de relatórios detalhados sobre a recolha de resíduos, tornando o processo mais transparente. Empresas e governos podem utilizar estas informações para melhorar a prestação de serviços e aumentar a responsabilidade na gestão de resíduos (Kamble et al., 2019).

Com a IoT aplicada à gestão de resíduos sólidos, as cidades podem avançar para um modelo de gestão mais eficiente, sustentável e inovador, melhorando a qualidade de vida dos seus habitantes e protegendo o meio ambiente.

2.2.4. Benefícios e Desafios do Uso de IoT na Gestão de Resíduos Sólidos

O uso de Internet das Coisas (IoT) na gestão de resíduos sólidos apresenta diversas vantagens, especialmente no que respeita à melhoria da eficiência operacional e à redução de custos. No entanto, a adopção da IoT também enfrenta desafios significativos, como questões de segurança de dados e elevados custos de implementação. Esta secção explora tanto os benefícios como os desafios associados à utilização da IoT na gestão de resíduos sólidos.

2.2.4.1. Benefícios

- **Eficiência Operacional:** Um dos principais benefícios do uso de IoT na gestão de resíduos sólidos é a melhoria da eficiência operacional. Sensores IoT instalados nos contentores fornecem informações em tempo real sobre o nível de enchimento, permitindo a optimização das rotas dos veículos de recolha. Esta optimização reduz significativamente o número de viagens desnecessárias e o consumo de combustível, contribuindo para a redução das emissões de carbono (Sharma e Singh, 2021). A recolha torna-se mais rápida e eficaz, melhorando a qualidade do serviço prestado aos cidadãos.

- **Redução de Custos:** A otimização de rotas e a redução de viagens desnecessárias resultam em economias consideráveis de recursos, como combustível e mão-de-obra. Adicionalmente, a monitorização contínua dos contentores evita a sobrecarga dos veículos de recolha, prolongando a sua vida útil e reduzindo os custos de manutenção. Estudos indicam que, com a utilização de IoT, as cidades podem reduzir os custos de recolha em até 30% (Khan et al., 2020).
- **Melhor Serviço ao Cidadão:** A utilização de IoT permite um serviço de recolha mais fiável e eficiente, melhorando a qualidade de vida dos cidadãos. Com a adopção de tecnologias de monitorização em tempo real, problemas como contentores cheios ou transbordantes podem ser evitados, resultando em cidades mais limpas e organizadas. Além disso, as autoridades municipais podem responder mais rapidamente às reclamações, aumentando a transparência e a satisfação dos munícipes (Gupta e Shah, 2020).

2.2.4.2. Desafios

- **Segurança de Dados:** O uso da IoT implica a recolha e transmissão de grandes volumes de dados, levantando preocupações quanto à segurança e privacidade das informações. Sistemas de gestão de resíduos baseados em IoT podem ser vulneráveis a ataques cibernéticos, comprometendo dados sensíveis e operações municipais. A protecção adequada dos dados pessoais recolhidos pelos sensores é uma preocupação crescente, sobretudo em países com défice de legislação específica relativa à protecção de dados (Montero et al., 2019).
- **Custo de Implementação:** Embora a IoT possa reduzir custos a longo prazo, o investimento inicial é elevado. A instalação de sensores, o desenvolvimento de plataformas de processamento e a integração com sistemas municipais existentes exigem recursos significativos. Em países em desenvolvimento, como Moçambique, estes custos representam uma barreira à adopção ampla de soluções IoT (Jagustovic et al., 2021).
- **Resistência à Mudança:** A transição para sistemas baseados em IoT requer alterações nos processos operacionais, o que pode encontrar resistência por parte das administrações municipais e operadores. A falta de familiaridade com as novas tecnologias, a necessidade de formação e os custos associados à adaptação tornam a implementação mais complexa e demorada (Kamble et al., 2019).

2.2.5. Tecnologias e Componentes Usados na Construção do Modelo Físico

- **ESP NodeMCU 8266**

O ESP NodeMCU 8266 é um módulo amplamente utilizado em projectos de Internet das Coisas (IoT) devido à sua versatilidade e baixo custo. Este módulo possui um firmware de código aberto que utiliza a linguagem de programação Lua, facilitando o desenvolvimento de aplicações. Além disso, emprega um sistema de ficheiros SPIFFS baseado em memória flash, permitindo a manipulação eficiente de ficheiros directamente no módulo. A sua implementação é construída com base na linguagem C e utiliza o Espressif NON-OS SDK, garantindo uma base robusta para programadores explorarem as suas funcionalidades.

Entre os recursos técnicos, o NodeMCU 8266 inclui uma interface USB-serial integrada, que simplifica a comunicação com computadores e outros dispositivos. O módulo também possui um regulador de tensão embutido, capaz de converter tensões de 5V para os 3,3V necessários para seu funcionamento, aumentando a flexibilidade de uso com diferentes fontes de alimentação.

Graças a estas características, o NodeMCU 8266 é uma solução prática para prototipagem e desenvolvimento de sistemas ligados à internet, sendo uma escolha popular tanto entre iniciantes quanto entre desenvolvedores experientes em projectos de IoT.

Tabela 2: Especificações e características do NodeMCU ESP8266

Fonte: Fonte: Espressif Systems (s.d.)

<i>Categoria Pino</i>	Nome	Descrição
<i>Power</i>	Micro-USB, 3.3V, GND, Vin	Micro-USB: Alimentação via porta USB. 3.3V: Entrada regulada para alimentar a placa. GND: Pinos de terra. Vin: Fonte de Alimentação externa.
<i>Control Pins</i>	EN, RST	O pino e o botão para reinicializar o microcontrolador.
<i>Analog Pin</i>	A0	Mede tensão analógica na faixa de 0-3.3V.
<i>GPIO Pins</i>	GPIO1 to GPIO16	16 pinos de entrada/saída de uso geral.
<i>SPI Pins</i>	SD1, CMD, SD0, CLK	Quatro pinos disponíveis para comunicação SPI.
<i>UART Pins</i>	TXD0, RXD0, TXD2, RXD2	Duas Interfaces UART, UART0 (RXD0 & TXD0) e UART1 (RXD1 & TXD1). UART1 é usada para carregar o firmware.
<i>I2C Pins</i>	-	Suporte à funcionalidade I2C, mas a definição de pinos depende da configuração do utilizador.

Especificações e características do NodeMCU ESP8266

<i>Parâmetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Microcontrolador</i>	Tensilica 32 bits RISC CPU Xtensa LX106
<i>Tensão de operação</i>	3.3V
<i>Tensão de entrada</i>	7-12V
<i>Pinos de I/O Digitais (DIO)</i>	16
<i>Pinos de entrada analógicos (ADC)</i>	1
<i>UARTs</i>	1
<i>SPIs</i>	1
<i>I2Cs</i>	1
<i>Memória flash</i>	4 MB
<i>SRAM</i>	64 KB
<i>Velocidade do relógio</i>	80 MHz

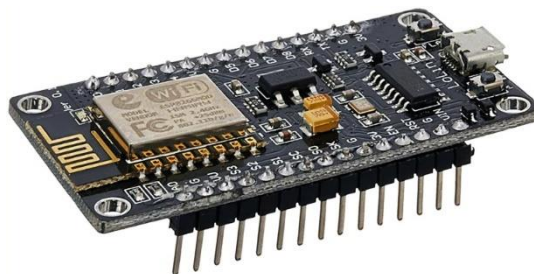


Figura 2: ESP NodeMCU 8266

Fonte: Adaptado de "NodeMCU Lua ESP8266 ESP-12E Wi-Fi Development Board" (s.d.)

- **Sensor Ultrassónico**

O Sensor de Distância Ultrassónico HC-SR04 é uma solução popular e económica para medições de distância em diversos projectos. Este sensor é capaz de detectar objectos a distâncias entre 2cm e 4m, oferecendo elevada precisão. O módulo integra um circuito completo com um emissor e um receptor de ondas sonoras, além de possuir quatro pinos principais: VCC, Trigger, ECHO e GND, que facilitam a sua ligação e operação.

Para realizar medições, é necessário energizar o módulo e enviar um sinal de nível alto ao pino Trigger por mais de 10 microsegundos. Esse comando faz com que o sensor emita ondas ultrassónicas, que, ao

colidirem com um obstáculo, retornam ao módulo. Durante o intervalo entre a emissão e a recepção das ondas, o pino ECHO permanece em nível alto.

A distância até ao objecto pode ser calculada com base no tempo em que o pino ECHO permaneceu activo após a activação do Trigger, aplicando uma fórmula que relaciona o tempo de trânsito das ondas com a velocidade do som.

Esta combinação de simplicidade e eficiência faz do HC-SR04 uma escolha popular em projectos de robótica, automação e dispositivos inteligentes.



Figura 3: Sensor Ultrasónico

Fonte: Mecânica Industrial (s.d.)

- **LED**

O LED (Light Emitting Diode) é um componente electrónico semiconductor amplamente utilizado em diversos dispositivos devido à sua eficiência e versatilidade. É constituído por um cristal semiconductor, geralmente fabricado com materiais como silício ou germânio, que são responsáveis pelas suas propriedades de condução eléctrica. Quando uma corrente eléctrica atravessa o LED, este emite luz como resultado de um processo chamado electroluminescência, fenómeno que ocorre quando electrões e lacunas se recombinaem no material semiconductor, libertando energia sob a forma de luz. Este princípio torna os LEDs altamente eficientes na conversão de energia eléctrica em energia luminosa.

A tecnologia utilizada nos LEDs é semelhante à encontrada em chips electrónicos, que também empregam materiais semicondutores. Esta capacidade de transformar energia em luz de forma directa torna o LED uma alternativa mais económica e duradoura em comparação com fontes de luz tradicionais.

Adicionalmente, os LEDs são amplamente reconhecidos pela sua longa vida útil, baixa emissão de calor e adaptabilidade em diversas aplicações, como iluminação, painéis electrónicos e indicadores em circuitos.



Figura 4: LED

Fonte: Robótica Educacional (s.d.)

- **Módulo GSM GPRS SIM800L com Antena**

O Módulo GSM/GPRS SIM800L constitui uma solução versátil para a integração de projectos de Internet das Coisas (IoT), permitindo a ligação à internet através de redes de telefonia móvel. Este módulo possibilita o envio e recepção de dados, mensagens SMS e a realização de chamadas telefónicas mediante a utilização de um cartão SIM. A sua capacidade de operar em múltiplas frequências, como GSM850MHz, EGSM900MHz, DCS1800MHz e PCS1900MHz, assegura compatibilidade com redes em diferentes regiões.

Com uma tensão de alimentação entre 3,7V e 4,2V, este módulo dispõe ainda de uma interface serial USB-TTL, o que facilita a integração com plataformas como Arduino e outros microcontroladores.

O SIM800L encontra-se montado numa placa que integra um *slot* para cartão MicroSIM, um LED indicador de funcionamento, e ligações para microfone e altifalante, além de suportar antenas externas do tipo U.FL. A sua configuração é efectuada por meio de comandos AT, que permitem a parametrização de redes GPRS e a gestão das comunicações de dados a longa distância, de forma eficiente.

Com suporte a protocolos como TCP/IP e autenticação PAP para conexões PPP, o módulo revela-se ideal para aplicações IoT que exijam conectividade robusta e fiável. Adicionalmente, suporta taxas de dados GPRS de até 85,6 kbps para uplink e downlink, operando em temperaturas entre -40°C e 85°C, o que amplia a sua aplicabilidade em condições ambientais diversas.

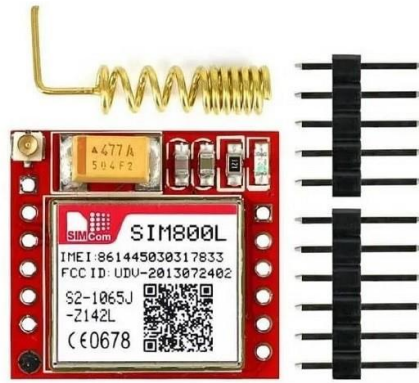


Figura 5: Módulo GSM/GPRS SIM800L

Fonte: Casa da Robótica (s.d.)

Material e Métodos

O objectivo deste capítulo é apresentar detalhadamente a abordagem metodológica adoptada para o desenvolvimento do Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos baseado em Internet das Coisas (IoT), descrevendo os materiais utilizados, os métodos de pesquisa aplicados, bem como o processo de concepção, desenvolvimento e implementação do protótipo funcional.

3.1 Metodologia

3.2.1. Metodologia do trabalho científico

Com vista a alcançar os objectivos definidos para a realização do presente estudo, foram considerados os objectivos específicos como base para concretizar, de forma mais eficaz, o objectivo geral. Foram identificadas as técnicas metodológicas e os processos necessários à elaboração do projecto. De acordo com Albuquerque (2015) a tipologia da pesquisa foi classificada quanto à natureza, aos objectivos e aos procedimentos.

Importa salientar que os dados qualitativos recolhidos no presente estudo baseiam-se numa amostra limitada, composta por seis entrevistas e observações realizadas num período específico. Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados como indicativos e exploratórios, não sendo possível generalizá-los de forma absoluta para todo o sistema municipal. Esta abordagem, contudo, revela-se adequada ao objectivo do estudo, que consiste no desenvolvimento e avaliação de uma solução tecnológica baseada em IoT.

3.2.2. Classificação da metodologia

a) Quanto à natureza

A presente pesquisa enquadra-se predominantemente como um estudo de engenharia de design, de natureza tecnológica, com abordagem aplicada e experimental. O foco principal recai no desenvolvimento, implementação e avaliação de um protótipo funcional de um sistema IoT, analisando o seu desempenho técnico e operacional. Complementarmente, foram utilizadas técnicas qualitativas (entrevistas e observação) para contextualizar o problema e apoiar a definição de requisitos.

b) Quanto aos objectivos

A presente pesquisa é exploratória e descritiva. Segundo Gil (2010), a pesquisa exploratória visa proporcionar uma compreensão inicial de um problema complexo, enquanto a pesquisa descritiva procura caracterizar determinado fenómeno ou determinada relação.

c) Quanto à abordagem

A abordagem do estudo é mista, integrando uma componente tecnológica e experimental, centrada no desenvolvimento e validação do sistema IoT, e uma componente qualitativa, utilizada para análise contextual e levantamento de requisitos.

d) Quanto aos procedimentos técnicos

A pesquisa é experimental, envolvendo o desenvolvimento de um protótipo funcional. De acordo com Kerlinger (1986), a pesquisa experimental pressupõe a manipulação de variáveis para testar hipóteses e compreender relações de causa e efeito.

3.2.3. Metodologia de Desenvolvimento do Sistema

Para o desenvolvimento do protótipo proposto, recorreu-se à metodologia de desenvolvimento de software Waterfall (ou modelo em cascata), amplamente utilizada em projectos de engenharia de software que apresentam requisitos bem definidos desde as fases iniciais. A adopção desta metodologia teve como objectivo garantir uma abordagem estruturada, sistemática e controlada ao longo de todo o ciclo de vida do sistema, assegurando a qualidade e a rastreabilidade do produto final.

O modelo em cascata caracteriza-se por uma sequência linear de fases, em que cada etapa deve ser concluída antes do início da seguinte, permitindo uma progressão ordenada do desenvolvimento. Este modelo é frequentemente representado como um fluxo contínuo e descendente, semelhante a uma cascata, no qual os resultados de cada fase servem de base para a fase subsequente. Segundo Sommerville (2011), o ciclo de vida do software no modelo Waterfall é constituído por cinco fases principais, conforme descritas a seguir.

✓ Análise e definição de requisitos:

Nesta fase procedeu-se à recolha e análise dos requisitos funcionais e não funcionais do sistema, com base em entrevistas, observações directas e análise documental. Foram identificados os serviços a disponibilizar, as restrições operacionais e os objectivos do sistema, resultando na definição clara das necessidades dos utilizadores e do contexto de aplicação. Esta etapa serviu como base para a especificação técnica do sistema.

✓ Projecto de sistema e software:

Com base nos requisitos definidos, foi concebida a arquitectura geral do sistema, incluindo a definição da estrutura de dados, dos componentes de software e hardware, dos fluxos de informação e das interfaces de utilizador. Nesta fase foram elaborados os diagramas UML e definida a organização do sistema em camadas, constituindo a base estrutural do protótipo desenvolvido.

✓ **Implementação e teste de unidade:**

Nesta etapa, o projecto foi materializado através da implementação dos módulos de software e da programação dos dispositivos IoT, nomeadamente o microcontrolador ESP8266. Cada componente foi desenvolvido de forma incremental e sujeito a testes unitários, com o objectivo de verificar o seu correcto funcionamento antes da integração com os restantes módulos do sistema.

✓ **Integração e teste de sistema:**

Após a implementação individual dos componentes, procedeu-se à integração do sistema como um todo, envolvendo a comunicação entre sensores, microcontroladores e a plataforma web Txuna ECO. Foram realizados testes funcionais e experimentais para verificar a conformidade do sistema com os requisitos definidos, bem como a fiabilidade da transmissão e processamento dos dados.

✓ **Operação e manutenção:**

Embora o sistema tenha sido desenvolvido em contexto académico e experimental, considerou-se a fase de operação e manutenção como parte integrante do ciclo de vida do software. Esta fase envolve a correcção de eventuais falhas não detectadas nas fases anteriores, bem como a adaptação do sistema a novos requisitos ou condições operacionais, conforme descrito no plano de manutenção preventiva apresentado neste trabalho.

A escolha do modelo Waterfall revelou-se adequada ao contexto do presente estudo, uma vez que permitiu um desenvolvimento organizado do protótipo, com requisitos claramente definidos e documentação consistente em todas as fases do processo.

• **Técnicas de recolha de dados**

A pesquisa recorre a técnicas de recolha de dados quantitativas e qualitativas, alinhadas com a definição de Creswell (2013). Os dados utilizados foram obtidos em contexto experimental. O tipo de tecnologia empregue e as condições do Conselho Municipal da Cidade de Maputo constituem factores susceptíveis de influenciar os resultados da pesquisa. Por conseguinte, foram testados e recolhidos os factores necessários para fornecer resultados consistentes e alinhados com os objectivos do estudo.

- **Observação:** Técnica de recolha de dados que utiliza os sentidos para captar determinados aspectos da realidade (Patton, 2015).
- **Entrevista:** Visa assegurar precisão, focalização, fidedignidade e validade na análise de interacções sociais, nomeadamente nas conversações (Kvale e Brinkmann, 2015).
- **Questionário:** Instrumento de recolha de dados composto por uma série ordenada de perguntas, respondidas por escrito e sem a presença do entrevistador (Bryman, 2016).
- **Formulário:** Conjunto de questões aplicadas e registadas por um entrevistador numa situação presencial (Robson e McCartan, 2016).

Para identificar os constrangimentos no sistema actual, foi necessário utilizar as seguintes técnicas de recolha de dados:

- **Entrevistas**

Foram conduzidas entrevistas formais e informais com funcionários do Departamento de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos do Conselho Municipal da Cidade de Maputo e da empresa ECOLIFE, responsável pela recolha actual de Resíduos Sólidos. O objectivo foi compreender o funcionamento do sistema existente. As entrevistas forneceram informações essenciais sobre a quantidade de veículos, o tipo de contentores e as práticas actuais de recolha. Realizaram-se ao longo de uma semana, de 10 a 17 de Maio de 2024, com duração média de 30 minutos cada. No total, foram realizadas 6 entrevistas: 3 formais e 3 informais. As entrevistas formais seguiram um guião estruturado, disponível no Apêndice 1, e abordaram os seguintes tópicos:

- Formas de Recolha de Resíduos Sólidos,
- Contentores: quantidade, tipos; capacidade.
- Veículos: quantidade; tipos; capacidade de recolha.

- **Análise Documental**

Foi consultado o Plano Director para a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Maputo, que contribuiu significativamente com dados sobre os recursos utilizados, a organização dos distritos municipais e outros aspectos relevantes para este estudo.

- **Observação**

Adoptou-se uma abordagem não-participativa de observação nos bairros de Polana Caniço, Maxaquene e Mafalala, na Cidade de Maputo, durante duas semanas, de 20 de Maio a 3 de Junho de 2024. O objectivo foi identificar dificuldades operacionais, como o estacionamento irregular que dificulta o

acesso dos veículos aos pontos de recolha, bem como verificar o tempo necessário para a recolha em diferentes pontos, influenciado pela forma como os resíduos são organizados pelos moradores.

- **Quanto às técnicas de análise de dados**

A análise de dados foi realizada com métodos quantitativos e qualitativos, em conformidade com Creswell (2013), que descreve a análise quantitativa como envolvendo estatísticas descritivas e a análise qualitativa como a interpretação de dados narrativos. No estudo, a análise qualitativa centrou-se na interpretação de dados não numéricos para compreender profundamente percepções, experiências e práticas relacionadas com a gestão de resíduos sólidos em Maputo.

As técnicas empregues foram:

- **Análise de Conteúdo:** Aplicada para interpretar dados textuais das entrevistas e observações, com o objectivo de identificar padrões e temas recorrentes (Bardin, 2011).
- **Análise de Discurso:** Aplicada para compreender as nuances e contextos nas respostas dos entrevistados, permitindo uma análise mais aprofundada das percepções e atitudes (Gee, 2014).

A ferramenta utilizada para a análise de dados foi:

- **Microsoft Excel:** Empregado para organizar e analisar os dados qualitativos, possibilitando a codificação, categorização e visualização de temas e padrões emergentes. Também foi utilizado para efectuar análises estatísticas descritivas dos dados quantitativos, facilitando a interpretação através de gráficos e tabelas.

No que se refere ao hardware, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- **Computador Portátil:** Utilizado para executar o software de análise de dados e armazenar as informações recolhidas.
- **Câmaras de *Smartphone*:** Empregues durante a observação para documentar visualmente as práticas de gestão de resíduos sólidos e identificar problemas operacionais.

Resultados e Discussão

O objectivo deste capítulo é apresentar os resultados da análise do Sistema de Gestão de Resíduos Sólidos no Distrito Urbano de KaMpfumo, integrado no Conselho Municipal da Cidade de Maputo, e discutir as soluções propostas para melhorar a eficiência e a sustentabilidade do processo. A subsecção 4.2.1 descreve o sistema actual de recolha e transporte de resíduos sólidos, enquanto a subsecção 4.2.2 aborda os constrangimentos e limitações do referido sistema.

Com base na visão geral do sistema e nas especificações dos requisitos funcionais e não funcionais (4.3.1 e 4.4.1), será apresentado um modelo detalhado para a gestão eficiente dos resíduos, incluindo diagramas UML, diagramas de casos de uso, diagrama de classes, diagrama de estados e diagrama de sequência de eventos, bem como a arquitectura do sistema e as tecnologias adoptadas. A implementação do modelo será discutida em subsecções que abrangem a preparação da plataforma web Txuna ECO, a programação de dispositivos como o ESP8266 NodeMCU, bem como os planos de instalação e manutenção preventiva do sistema, com o intuito de assegurar a continuidade e a operação eficaz da solução proposta.

4.1 Conselho Municipal da Cidade de Maputo

O Conselho Municipal da Cidade de Maputo (CMCM) é a entidade responsável pela administração da cidade de Maputo, capital de Moçambique. Com a missão de promover o desenvolvimento urbano sustentável, o CMCM implementa políticas públicas que abrangem diversas áreas, incluindo saúde, educação, segurança e, especialmente, a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU). Para garantir uma gestão eficiente dos resíduos, o conselho apoia-se na legislação municipal, em regulamentos e em parcerias com a sociedade civil e o sector privado.

De acordo com o CMCM (2024), a gestão de RSU é uma das prioridades do município, que procura não apenas recolher e descartar resíduos, mas também promover a consciencialização ambiental entre os cidadãos.

Através de programas de sensibilização e campanhas educativas, o CMCM incentiva a separação dos resíduos na origem e a adopção de práticas de reciclagem. Num contexto urbano em crescimento, como o de Maputo, a eficácia da gestão de resíduos é crucial para a saúde pública e para a protecção

ambiental (Silva et al., 2018). O CMCM implementa diversas medidas para enfrentar os desafios da urbanização e promover uma cidade limpa e sustentável.

A Cidade de Maputo encontra-se administrativamente dividida em sete distritos municipais: KaMpfumo, Nhlamankulu, KaMaxaquene, KaMavota, KaMubukwana, KaNyaka e KaTembe. Cada um destes distritos apresenta características geográficas, demográficas e sócio-económicas distintas, reflectindo a diversidade populacional e a variedade de serviços e infra-estrutura disponíveis.

Tabela 3: Divisão Administrativa da Cidade de Maputo

Fonte: (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023)

<i>Unidade Administrativa Autárquica</i>	Bairros Povoações
<i>Distrito Urbano de KaMpfumo</i>	Central A, B e C; Alto Maé A e B; Malhangalene A e B; Polana Cimento A e B, Coop e Sommerchild.
<i>Distrito Urbano de Nhlamankulu</i>	Aeroporto A e B; Xipamanine; Minkadjuine; Unidade 7; Chamanculo A, B, C e D; Malanga e Munhuana.
<i>Distrito Urbano de KaMaxaquene</i>	Mafalala; Maxaquene A, B, C e D; Polana Caniço A e B e Urbanização.
<i>Distrito Urbano de KaMavota</i>	Mavalane A e B; FPLM; Hulene A e B; Ferroviário; Laulane; 3 de Fevereiro; Mahotas, Albazine e Costa do Sol.
<i>Distrito Urbano de KaMubukwana</i>	Bagamoyo; Benfica; Inhagoia A e B; Jardim, Luís Cabral; Magoanine; Malhazine; Nsalane; 25 de Junho A e B; e Zimpeto.
<i>Distrito Municipal de KaNyaka</i>	Ingwane; Ribjene e Nhaquene.
<i>Distrito Municipal de KaTembe</i>	Gwachene; Chale; Inguice; Ncassene e Xamissava.

O Conselho Municipal da Cidade de Maputo (CMCM) é um órgão executivo colegial que opera em conformidade com a Constituição da República de Moçambique, com as leis vigentes e com os regulamentos municipais. O CMCM é responsável por implementar políticas públicas e assegurar serviços essenciais à população, incluindo a gestão eficaz dos resíduos sólidos urbanos (RSU).

Para coordenar essas actividades, o CMCM conta com diversas direcções, sendo que a gestão de resíduos sólidos se encontra sob responsabilidade da Direcção de Serviço Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Salubridade (DMGRSUS).

Na Cidade de Maputo, a produção de resíduos sólidos urbanos é expressiva, atingindo cerca de 450.000 toneladas por ano. Deste total, os Resíduos Sólidos Domésticos (RSD) representam a maior parcela, com uma média de 700 toneladas por dia (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023). Este

volume de resíduos exige uma gestão rigorosa e eficiente, tendo em conta a diversidade dos resíduos gerados.

Tabela 4: Tipos de Resíduos Sólidos Urbanos

Fonte: (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023)

<i>Tipos de RSU</i>	Proveniência
<i>Resíduos Sólidos Domésticos</i>	Habitações ou locais semelhantes.
<i>Resíduos Sólidos Comerciais</i>	Estabelecimentos comerciais, instituições públicas, escritórios, restaurantes e locais semelhantes.
<i>Resíduos Sólidos Industriais</i>	Gerados em actividades ou processos industriais, além de produção e distribuição de eletricidade, gás e água.
<i>Resíduos Verdes</i>	Resultantes da limpeza e manutenção de jardins ou hortas, incluindo aparas, ramos, troncos e relva.
<i>Resíduos de Mercados e Feiras</i>	Produzidos em mercados e feiras.

Tabela 5: Resumo das Quantidades de RSU Produzidas Diariamente na Cidade de Maputo

Fonte: (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023)

<i>Tipos de RSU</i>	Produção por Dia [ton/dia]	Produção por Dia %
<i>RS Domésticos</i>	700	56%
<i>RS Comerciais/ Industriais</i>	300	24%
<i>RS de Mercados e Feiras</i>	100	8%
<i>RS da Construção</i>	70	6%
<i>RS Verdes</i>	50	4%
<i>RS da Varredura</i>	30	2%
<i>RS Volumosos</i>	20	2%
<i>Total RSU em Maputo</i>	1.370	100%

4.2 Distrito Municipal de KaMpfumo

O Distrito Municipal de KaMpfumo é uma das áreas urbanas que integram a Cidade de Maputo, capital de Moçambique. Localizado na parte central da cidade, o distrito caracteriza-se por uma população diversificada e por um ambiente urbano dinâmico. KaMpfumo é reconhecido pelas suas áreas residenciais, comerciais e institucionais, reflectindo uma combinação de actividades sociais e económicas que contribuem para o desenvolvimento da cidade.

KaMpfumo abriga uma população expressiva, composta por diferentes grupos sócio-económicos. As comunidades são constituídas, maioritariamente, por residentes locais, que habitam desde casas

unifamiliars até apartamentos. A dinâmica social do distrito é marcada pela convivência de diferentes culturas e tradições, manifestando-se nas práticas quotidianas e nas festividades locais.

De acordo com dados recentes, a população de KaMpfumo estima-se em 150.000 habitantes (Instituto Nacional de Estatística, 2023). A sua diversidade demográfica cria um contexto favorável à implementação de políticas públicas, especialmente nas áreas de educação, saúde e gestão de resíduos sólidos. O acesso a serviços essenciais e a participação comunitária constituem factores determinantes para a qualidade de vida dos residentes.

O distrito é um importante centro de actividade económica, com uma combinação de comércio local e serviços. Várias pequenas e médias empresas (PMEs) operam em KaMpfumo, contribuindo para a geração de empregos e para o dinamismo da economia local. A presença de mercados, lojas e serviços de alimentação responde às necessidades dos residentes e visitantes. A área encontra-se próxima de instituições públicas e privadas, facilitando o acesso a serviços administrativos e sociais (Gonçalves e Nhamo, 2023).

Tal como em muitas áreas urbanas, o Distrito de KaMpfumo enfrenta desafios significativos na gestão de resíduos sólidos. A geração de resíduos na região é elevada, e o aumento da população e das actividades comerciais acentua a pressão sobre os sistemas de recolha e disposição. A produção de resíduos sólidos em KaMpfumo estima-se em cerca de 300 toneladas por dia, sendo os resíduos domésticos a principal componente dessa produção (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023).

A Direcção de Serviço Municipal de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos e Salubridade (DMGRSUS), responsável pela gestão de resíduos na cidade, tem implementado iniciativas destinadas a melhorar a recolha e o tratamento de resíduos em KaMpfumo. Entre essas iniciativas destacam-se campanhas de sensibilização sobre a importância da separação de resíduos, bem como a promoção da reciclagem e da compostagem. No entanto, a eficácia destas iniciativas depende da consciencialização e da participação activa da comunidade (Silva et al., 2023).

4.2.1. Sistema actual de recolha e transporte de RSD no Distrito Urbano de KaMpfumo

A gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) na cidade de Maputo é da responsabilidade do Conselho Municipal da Cidade de Maputo (CMCM), o órgão executivo que actua em conformidade com as leis e regulamentos aplicáveis (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023). A gestão de RSU é uma das principais prioridades do município, em virtude do crescimento populacional e do consequente aumento da produção de resíduos, o que exige uma coordenação eficaz entre os serviços públicos e o sector privado para assegurar a limpeza urbana e a protecção da saúde pública (MICOA, 2023).

Face a desafios relacionados com infra-estruturas e capacidade operacional, o CMCM tem vindo a terceirizar algumas actividades associadas à recolha e transporte de Resíduos Sólidos Domésticos (RSD), com o objectivo de garantir a eficácia e eficiência no processo de gestão de resíduos. A contratação de empresas privadas para apoiar essas tarefas permite colmatar lacunas na capacidade de resposta dos serviços municipais e assegurar um serviço de melhor qualidade (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023; Horta, 2023).

A recolha e transporte de RSD na cidade de Maputo consiste na recolha dos resíduos depositados pelos munícipes e no seu transporte até locais de tratamento ou disposição final, como aterros sanitários. No Distrito Municipal n.º 1, esta actividade é actualmente desempenhada pela empresa privada ECOLIFE, uma das entidades que colabora com o CMCM. A ECOLIFE é responsável por cumprir os padrões e regulamentos municipais, sob a monitorização directa do Conselho Municipal, assegurando que a recolha e transporte de resíduos ocorram dentro dos parâmetros estabelecidos (ECOLIFE, 2023).

Relativamente à infra-estrutura disponível para a recolha de resíduos, a cidade de Maputo dispõe de aproximadamente 600 contentores de deposição indiferenciada distribuídos por várias zonas, com capacidades entre 1,1 m³ e 6 m³, conforme ilustrado na Figura 6. Estes contentores são utilizados pelos residentes para o depósito de resíduos domésticos, sendo que os horários para a deposição são estabelecidos e variam por zona, com um período comum entre as 15h30 e 18h30 (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023). Em áreas de maior prestígio, como zonas onde se encontram embaixadas e residências de alto padrão, a recolha é efectuada porta-a-porta, com serviços personalizados para estas áreas, designadas “zonas VIP” (Horta, 2023).

Nos pontos de recolha, os contentores são agrupados conforme a necessidade local, podendo variar entre 1 a 6 contentores por ponto. Para garantir a eficiência da recolha, utilizam-se veículos compactadores com capacidades entre 20 m³ e 30 m³, permitindo maximizar o volume de resíduos recolhidos graças ao mecanismo de compactação. Estes veículos conseguem recolher grandes quantidades de resíduos numa única viagem, o que contribui para a redução de custos e para a optimização da operação. Para recolhas em zonas específicas, com serviço porta-a-porta, são utilizados veículos de caixa aberta, adequados para volumes menores e maior frequência (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023; ECOLIFE, 2023).

Cada veículo utilizado no processo de recolha é operado por uma equipa composta por um motorista e dois cantoneiros, responsáveis pelo manuseamento dos resíduos e pelo esvaziamento dos contentores. A recolha é feita diariamente, com início às 18h30, e cada rota tem uma duração média de 8 horas. Quando não atingem a capacidade máxima, os veículos podem concluir a rota programada e

descarregar os resíduos na estação de transferência ou aterro no fim do turno, iniciando uma nova rota apenas após esse procedimento (ECOLIFE, 2023; Horta, 2023).

Com a crescente pressão sobre os serviços de gestão de resíduos, o Conselho Municipal da Cidade de Maputo tem procurado inovar e melhorar a eficiência do sistema, considerando, inclusive, a implementação de soluções tecnológicas, como sistemas de planeamento de rotas que permitam otimizar as recolhas e reduzir os custos operacionais (MICOA, 2023).



Figura 6: Contentor de 1,1m³ e Contentor de 6m³

4.2.2. Constrangimentos e limitações do sistema actual de recolha e transporte de RSD no Distrito Urbano de KaMpfumo

O sistema de recolha e transporte de Resíduos Sólidos Domésticos (RSD) no Distrito Urbano de KaMpfumo enfrenta diversos constrangimentos e limitações, tanto de ordem técnica como estrutural, que comprometem a eficácia do serviço. Estes desafios são comuns em áreas urbanas de elevada densidade populacional e têm impacto directo na qualidade de vida dos munícipes, bem como na salubridade e na sustentabilidade ambiental. A seguir, apresentam-se alguns dos principais constrangimentos e limitações:

a) Défice de Infra-estrutura e Equipamentos

A infra-estrutura existente no Distrito de KaMpfumo revela-se insuficiente para responder de forma adequada à procura decorrente da quantidade de resíduos gerados diariamente. Apesar da instalação de aproximadamente 600 contentores para deposição de resíduos sólidos em toda a cidade de Maputo, esta quantidade não é suficiente para responder ao crescimento acentuado do volume de resíduos, sobretudo em áreas densamente povoadas.

Por sua vez, a capacidade volumétrica dos contentores, que varia entre 1,1 m³ e 6 m³, muitas vezes não corresponde à quantidade real de resíduos produzida, originando transbordos e má gestão dos resíduos nas áreas mais povoadas.

Este problema agrava-se com a escassez de veículos compactadores suficientes para assegurar uma recolha eficiente. Os compactadores disponíveis, com capacidades entre 20 m³ e 30 m³, frequentemente não conseguem cumprir todas as rotas programadas, resultando numa recolha irregular. A insuficiência de equipamentos adequados provoca atrasos nas operações e acumulação de resíduos em espaços públicos, aumentando a poluição e os riscos para a saúde pública (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023; ECOLIFE, 2023).

b) Frequência Inadequada de Recolha

A frequência de recolha de resíduos no Distrito de KaMpfumo constitui outra limitação significativa do sistema actual. Embora a recolha seja, em teoria, realizada diariamente, os atrasos são recorrentes em várias áreas, sobretudo durante feriados e fins-de-semana, quando o volume de resíduos aumenta consideravelmente.

Nessas ocasiões, a capacidade limitada dos veículos e a ausência de um planeamento eficaz de rotas resultam na acumulação excessiva de resíduos, comprometendo a limpeza das ruas e dos espaços públicos. A recolha irregular contribui para a sobrelotação dos contentores, criando condições desfavoráveis à salubridade urbana e à organização do espaço público, além de favorecer a presença de vectores, como moscas, mosquitos e roedores.

Em muitas áreas, a recolha ocorre fora dos horários estabelecidos, deixando os resíduos expostos por longos períodos. Estes atrasos agravam o desgaste dos equipamentos, dado que a sobrecarga acelera a deterioração dos contentores e dos veículos compactadores (MICOA, 2023; Horta, 2023).

c) Gestão Ineficiente de Rotas

A ausência de um sistema adequado de planeamento de rotas constitui um dos principais entraves à eficiência da recolha de resíduos no distrito. Actualmente, o planeamento é realizado manualmente, sem recurso a tecnologias de apoio, como sistemas de navegação por GPS ou software de optimização de rotas.

Este cenário origina rotas redundantes, longas e ineficazes, que não maximizam a utilização dos recursos disponíveis, como veículos e mão-de-obra. Além disso, a falta de monitorização em tempo real impede que o Conselho Municipal e as empresas terceirizadas, como a ECOLIFE, ajustem rapidamente as rotas em função das necessidades diárias e das variações no volume de resíduos.

Sem essa flexibilidade, a recolha de resíduos torna-se ineficiente, com algumas zonas a serem negligenciadas, enquanto outras recebem atenção desproporcionada. A ausência de planeamento

adequado aumenta os custos operacionais, incluindo consumo de combustível, desgaste dos veículos e maior tempo de trabalho (ECOLIFE, 2023; Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023).

d) Inadequação no Manuseamento dos Resíduos por Parte da População

O comportamento inadequado dos munícipes no manuseamento dos resíduos agrava os desafios do sistema de recolha no Distrito de KaMpfumo. Embora o Conselho Municipal tenha estipulado horários específicos para a deposição de resíduos nos contentores, muitos munícipes não cumprem essas directrizes. Em consequência, os resíduos são frequentemente depositados fora do horário permitido, contribuindo para a acumulação, a emissão de maus odores e a atracção de animais que espalham os resíduos pelas vias públicas.

A falta de educação ambiental e de campanhas contínuas de sensibilização acentua este problema. Muitos munícipes não possuem plena consciência dos impactos negativos que a deposição inadequada de resíduos pode causar no meio ambiente, na organização do espaço urbano e nas condições de salubridade ambiental. Mesmo com a instalação de contentores em áreas específicas, a sua má utilização por parte da população perpetua um ciclo vicioso de ineficiência na gestão de resíduos. Este comportamento inadequado, aliado à falta de fiscalização eficaz, compromete os esforços do município para manter a cidade limpa e organizada (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023; MICOA, 2023).

Importa referir que estas observações resultam de uma amostra limitada, devendo ser interpretadas como tendências indicativas do comportamento do sistema, e não como uma caracterização estatisticamente representativa do município.

e) Condições de Trabalho Precárias para os Trabalhadores

Os trabalhadores responsáveis pela recolha de resíduos no Distrito de KaMpfumo enfrentam condições laborais adversas, que afectam directamente a sua produtividade. Muitos desses trabalhadores, incluindo motoristas e cantoneiros, trabalham em turnos prolongados, sem os devidos equipamentos de protecção individual (EPI) e com remuneração relativamente baixa.

A exposição constante a resíduos potencialmente perigosos, sem protecção adequada, coloca em risco a saúde destes trabalhadores.

A falta de formação contínua constitui igualmente uma limitação significativa. Sem treino adequado, os trabalhadores podem desconhecer as melhores práticas de manuseamento e recolha de resíduos, comprometendo a eficiência do serviço. Adicionalmente, a elevada rotatividade de pessoal, aliada à

ausência de incentivos, desmotiva os trabalhadores, resultando num serviço de menor qualidade e com maior probabilidade de falhas (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023; MICOA, 2023).

f) Falta de Integração Tecnológica

A tecnologia desempenha um papel fundamental na melhoria dos serviços de recolha de resíduos, contudo, o Distrito de KaMpfumo continua a enfrentar desafios significativos neste domínio. A ausência de integração de sistemas tecnológicos avançados, como sensores para monitorização da capacidade dos contentores e software de optimização de rotas, compromete a eficiência do serviço. Estes sistemas permitiriam uma monitorização em tempo real, possibilitando o ajuste da frequência da recolha em função das necessidades específicas de cada área.

Por outro lado, a inexistência de ferramentas digitais para a gestão dos resíduos dificulta a comunicação entre os diversos intervenientes no processo, desde os trabalhadores até as entidades de gestão municipal. A implementação de plataformas tecnológicas facilitaria igualmente a transparência e a prestação de contas, permitindo que a população acompanhasse o estado da recolha na sua área e reportasse problemas de forma mais eficaz (ECOLIFE, 2023; Horta, 2023).

g) Poluição Ambiental e Saúde Pública

A inadequação do sistema de recolha de resíduos no Distrito de KaMpfumo tem repercussões relevantes no meio ambiente e nas condições de salubridade urbana. O acúmulo de resíduos nos espaços públicos, como ruas e mercados, provoca poluição visual e olfactiva, além de criar condições desfavoráveis à organização do espaço urbano e à gestão sanitária do ambiente.

A presença prolongada de resíduos favorece igualmente a ocorrência de vectores, como mosquitos, ratos e baratas, reforçando a necessidade de sistemas de recolha mais regulares e eficientes, de modo a reduzir situações de insalubridade ambiental e degradação dos espaços públicos.

A poluição causada pelos resíduos não recolhidos compromete frequentemente os sistemas de drenagem, sobretudo durante a época chuvosa, originando inundações e outros problemas associados. A contaminação dos cursos de água constitui igualmente uma consequência grave, dado que os resíduos são arrastados para rios e mares, afectando os ecossistemas locais e a qualidade da água consumida pela população (Conselho Municipal da Cidade de Maputo, 2023; Horta, 2023).

4.3 Descrição da proposta de solução

A proposta apresentada consiste na implementação de um sistema inteligente, baseado em sensores de baixo custo, para monitorizar o volume de resíduos sólidos urbanos em contentores distribuídos pelas

áreas urbanas. Este sistema tem como objectivo otimizar as rotas de recolha de resíduos, tornando o processo mais eficiente e reduzindo os custos operacionais.

Uma das inovações centrais desta solução é a introdução de um Painel de Controlo Móvel, que disponibiliza aos condutores, informações em tempo real sobre as rotas diárias, bem como a localização exacta de cada contentor no mapa, proporcionando um maior controlo logístico.

A optimização das rotas de recolha não só aumenta a eficiência do sistema, como também reduz o consumo de combustível das frotas, diminuindo os impactos ambientais associados à emissão de CO₂. O desenvolvimento de um sistema inteligente, capaz de emitir alertas sobre o estado dos contentores, é fundamental. Este modelo permite monitorizar os níveis de resíduos em tempo real, verificando se se encontram dentro dos limites adequados. Caso estes sejam ultrapassados, o sistema envia alertas automáticos através de LEDs indicadores e aplicações ligadas à internet, agilizando a resposta das equipas de recolha.

O sistema proposto estrutura-se em três camadas principais:

- Primeira camada - Contentores inteligentes: equipados com sensores ultrassónicos para detecção do nível de resíduos, integrados num microcontrolador NodeMCU ESP8266, responsável pelo processamento e envio dos dados para a plataforma IoT Txuna ECO. Esta plataforma na nuvem permite a monitorização remota e gráfica dos níveis de resíduos, acessível a partir qualquer local, oferecendo uma visão clara e actualizada do estado dos contentores, em tempo real.

Os contentores dispõem de tecnologias de comunicação sem fios e GPS, que fornecem a localização exacta, bem como fontes de energia sustentáveis, com baterias recarregáveis por painéis solares.

- Segunda camada - Middleware: responsável por receber os dados transmitidos pelos sensores, realizar o tratamento e validação necessários, e armazená-los para análises futuras. Esta camada é essencial para garantir a integridade dos dados e possibilitar a sua utilização na optimização das rotas e na tomada de decisões estratégicas.
- Terceira camada - Aplicação: Composta por um Painel de Controlo acessível via *smartphones* ou computadores, permitindo às empresas responsáveis pela recolha consultar dados em tempo real. Por meio desta interface, as concessionárias podem visualizar as coordenadas dos contentores, verificar a quantidade de resíduos em cada um e planificar rotas mais eficientes, priorizando as zonas com maior necessidade.

A implementação desta tecnologia torna o processo de recolha mais eficiente, sustentável e economicamente viável.

Com esta solução, os condutores podem consultar facilmente as coordenadas dos contentores mais próximos e verificar os níveis de enchimento, evitando o depósito inadequado de resíduos em contentores já cheios e promovendo maior organização na gestão de resíduos. Para as empresas, a visualização em tempo real permite uma gestão otimizada das rotas, garantindo melhor utilização dos recursos, redução de custos e maior sustentabilidade das operações.

Em síntese, a proposta introduz inovação no sector de gestão de resíduos, recorrendo a tecnologias emergentes para criar um ciclo mais eficiente e sustentável de recolha e tratamento de RSU.

4.3.1. Visão Geral do Sistema

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Conselho Municipal da Cidade de Maputo (CMCM) constitui um processo complexo e multifacetado, abrangendo todas as etapas do ciclo de vida dos resíduos, desde a geração até à deposição final. O sistema de gestão de RSU foi concebido com o objectivo de melhorar a limpeza urbana, proteger a saúde pública e minimizar os impactos ambientais na cidade de Maputo.

O CMCM utiliza uma combinação de infra-estruturas municipais, regulamentos e parcerias com o sector privado para assegurar uma gestão eficiente dos resíduos. A estrutura do sistema organiza-se em três componentes principais:

- **Recolha e Transporte de Resíduos:** A recolha é efectuada por veículos compactadores e camiões de pequeno porte, especialmente nas "zonas VIP" e em áreas de elevada densidade populacional. A logística de transporte é otimizada para reduzir custos e tempo de operação.
- **Tratamento e Destino Final:** Os resíduos recolhidos são encaminhados para locais específicos, como aterros sanitários e instalações de reciclagem, em conformidade com as normas de salubridade e protecção ambiental.
- **Separação e Reciclagem na Origem:** Em colaboração com a comunidade e empresas privadas, o CMCM promove a separação dos resíduos nos locais de geração, com vista a aumentar a taxa de reciclagem e reduzir o volume de resíduos destinados aos aterros.

Visão Geral do Sistema



Figura 7: Visão Geral do Sistema

4.4. Análise e Definição de Requisitos

A análise e definição de requisitos para o sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos tem como objectivo estabelecer os componentes e funcionalidades essenciais ao bom funcionamento do sistema. Esta etapa é crucial para garantir que o sistema responda à todas as necessidades operacionais e seja compatível com as metas e desafios identificados no processo de gestão de resíduos em Maputo.

A definição de requisitos permite ainda uma melhor adaptação do sistema às condições locais, incluindo as infra-estruturas existentes, os recursos disponíveis e a realidade sócio-económica da população.

4.4.1. Âmbito do Sistema

O âmbito do sistema de gestão de resíduos sólidos abrange desde a recolha inicial dos resíduos até à deposição final, incluindo etapas intermédias de separação, reciclagem, transporte e monitorização.

O sistema deve:

- **Integrar-se com as actividades municipais de recolha e tratamento de resíduos:** assegurar a coordenação com os serviços públicos e empresas terceirizadas, para garantir que os resíduos sejam recolhidos e tratados adequadamente.
- **Suportar a gestão e monitorização de dados em tempo real:** possibilitar o acompanhamento das rotas, do volume de resíduos, da frequência de recolha e do estado das infra-estruturas (ex.: contentores e aterros).

- **Facilitar a comunicação e interacção com a comunidade:** incluir mecanismos para reportar problemas, fornecer informações sobre a separação de resíduos e recolher a opinião dos munícipes.
- **Oferecer suporte à tomada de decisões:** disponibilizar relatórios detalhados sobre o desempenho do sistema e o impacto ambiental, ajudando o Conselho Municipal da Cidade de Maputo a ajustar as operações conforme necessário.

4.4.2. Grupos de Interesse

Os grupos de interesse envolvidos no sistema de gestão de resíduos sólidos incluem:

- **Conselho Municipal da Cidade de Maputo:** Principal entidade responsável pela implementação e fiscalização do sistema, assegurando que este opere em conformidade com as políticas ambientais e de saúde pública. O CMCM é igualmente responsável pelo financiamento, pela gestão das infra-estruturas e pela supervisão das operações.
- **Comunidade Local:** Os munícipes de Maputo desempenham um papel fundamental, sendo responsáveis pela separação dos resíduos e pela utilização adequada dos pontos de recolha. A participação da comunidade é essencial para o êxito do sistema, pois garante a adopção das práticas de reciclagem e separação na origem.
- **Empresas Privadas Terceirizadas:** Entidades contratadas para a recolha, transporte e, em alguns casos, tratamento de resíduos, operando em parceria com o CMCM para assegurar cobertura adequada, especialmente em áreas de elevada densidade populacional e zonas de difícil acesso.
- **Organizações Não Governamentais (ONG) e Entidades Ambientais:** Estas organizações actuam como parceiras no desenvolvimento de campanhas de sensibilização e na promoção de práticas sustentáveis de gestão de resíduos, além de fornecerem apoio técnico e financeiro para a implementação de melhorias no sistema.
- **Empresas de Reciclagem:** Responsáveis pelo processamento dos materiais recolhidos, contribuindo para a redução do volume de resíduos destinados aos aterros e promovendo a sustentabilidade e a economia circular.
- **Governo Central e Agências Reguladoras:** Fornecem o quadro legal e as políticas de gestão ambiental, apoiando o CMCM na obtenção de recursos e assegurando que o sistema cumpra as normas nacionais de saúde pública e protecção ambiental.

4.4.3. Convenções

Para assegurar uma compreensão estruturada e organizada dos requisitos do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos, este documento seguirá as seguintes convenções:

- **Identificação dos Requisitos:** Cada requisito funcional será associado a um identificador único, seguido de uma descrição clara e objectiva. Este identificador facilitará a referência e acompanhamento dos requisitos durante o desenvolvimento do sistema.

Exemplo: **RF001:** *Monitorização do Nível de Resíduos.*

- **Identificação dos Casos de Uso:** Cada caso de uso será registado com um identificador único e acompanhado de uma descrição detalhada das interações dos utilizadores com o sistema. Este registo facilitará a compreensão dos fluxos de trabalho e das funcionalidades oferecidas.

Exemplo: **CU001:** *Caso de Uso - Acesso ao Painel de Controlo Móvel.*

- **Classificação dos Requisitos:** Os requisitos do sistema serão organizados em categorias, com base na sua natureza funcional ou não funcional, permitindo uma abordagem mais sistemática à gestão das exigências.
- **Prioridades dos Requisitos:** Os requisitos serão classificados segundo a sua importância e impacto no funcionamento do sistema, utilizando a abordagem proposta por Sommerville.

A classificação será feita nas seguintes categorias:

- **Requisitos Críticos (C):** Essenciais; a sua ausência compromete gravemente a funcionalidade do sistema. Devem ser implementados com prioridade máxima.
- **Requisitos Importantes (I):** Têm impacto significativo na usabilidade e eficiência, mas a sua ausência não impede o funcionamento básico do sistema. Implementação após os críticos.
- **Requisitos Desejáveis (D):** Melhoram a experiência do utilizador ou acrescentam funcionalidades adicionais, mas não são indispensáveis para a operação inicial. Implementação recomendada em versões futuras.

4.4.4. Requisitos Funcionais

Os requisitos funcionais (RF) definem os serviços que o sistema deve disponibilizar, especificando como deve reagir a entradas específicas e comportar-se em diversas circunstâncias. Além disso, estes requisitos podem indicar comportamentos que o sistema deve evitar.

A seguir, apresentam-se os requisitos funcionais que orientarão o desenvolvimento do sistema, organizados segundo as categorias de prioridade propostas por Sommerville:

Tabela 6: Requisitos Funcionais

ID	REQUISITO FUNCIONAL	DESCRIÇÃO DO REQUISITO	PRIORIDADE
RF001	Monitorização do Nível de Resíduos	O sistema deve monitorizar em tempo real o nível de resíduos em cada contentor.	Crítico
RF002	Envio de Alertas Automáticos	O sistema deve enviar alertas automáticos quando o nível de resíduos ultrapassar um limite predefinido.	Crítico
RF003	Integração com Plataforma IoT	O sistema deve integrar-se com a plataforma IoT Txuna ECO para armazenamento e visualização dos dados.	Importante
RF004	Localização GPS dos Contentores	O sistema deve utilizar tecnologia GPS para fornecer a localização exacta de cada contentor, acessível no Painel de Controlo.	Importante
RF005	Acesso Remoto ao Painel de Controlo	O sistema deve permitir que o painel de controlo seja acedido por <i>smartphones</i> e computadores, garantindo flexibilidade aos utilizadores.	Desejável

4.4.5. Requisitos Não Funcionais

Os requisitos não funcionais (RNF) impõem restrições sobre os serviços ou funções que o sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos deve disponibilizar. Eles abrangem aspectos cruciais, como tempo de resposta, restrições no processo de desenvolvimento e exigências normativas.

Ao contrário dos requisitos funcionais, que se concentram em acções específicas, os requisitos não funcionais aplicam-se à totalidade do sistema, influenciando a experiência do utilizador e o desempenho global.

A seguir, apresentam-se os requisitos não funcionais que devem ser considerados durante o desenvolvimento do sistema:

Tabela 7: Requisitos Não Funcionais

ID	REQUISITO NÃO FUNCIONAL	DESCRIÇÃO DO REQUISITO
RNF001	Desempenho	O sistema deve apresentar um tempo de resposta máximo de até 3 segundos para carregamento de dados e 1 segundo para interações críticas do utilizador no Painel de Controlo.
RNF002	Escalabilidade	O sistema deve suportar um aumento de 50% no número de utilizadores, sem degradação do desempenho.
RNF003	Segurança	O sistema deve garantir a protecção dos dados através de encriptação e autenticação robusta.
RNF004	Usabilidade	O sistema deve ser intuitivo e fácil de utilizar, permitindo que novos utilizadores aprendam a operá-lo em menos de uma hora.
RNF005	Manutenção	O sistema deve ser concebido para facilitar a manutenção preventiva e correctiva dos seus componentes, assegurando acesso simples, substituição eficiente e redução do tempo de

		inactividade operacional.
RNF006	Conformidade	O sistema deve cumprir as normas locais e internacionais relativas à protecção de dados e privacidade.
RNF007	Resistência Ambiental	O sistema deve garantir a protecção dos componentes instalados em ambientes externos, através da utilização de dispositivos com classificação mínima IP67 ou, alternativamente, através da implementação de mecanismos de protecção física (encapsulamento) que assegurem resistência a condições adversas como humidade, poeira e exposição à água.

4.5. Projecto de sistema e software

4.5.1. Requisitos de Software

A Tabela 8 apresenta os requisitos específicos que devem ser atendidos pelo software do sistema, incluindo funcionalidades essenciais e integrações necessárias. Estes requisitos abrangem tanto aspectos funcionais como não funcionais, assegurando que o sistema cumpra os objectivos definidos e opere de forma eficiente.

Tabela 8: Requisitos de Software

ID	REQUISITO NÃO FUNCIONAL	DESCRIÇÃO DO REQUISITO
RFS001	Processamento de Dados de Sensores	O software deve receber, validar e processar os dados transmitidos pelos sensores instalados nos contentores.
RFS002	Integração com a Plataforma Txuna ECO	O software deve integrar-se com a plataforma IoT Txuna ECO para armazenamento e visualização dos dados recolhidos.
RFS003	Envio de Notificações	O software deve notificar automaticamente os utilizadores em caso de lotação dos contentores, através de aplicação ou e-mail.

4.5.2. Diagrama de casos de USO

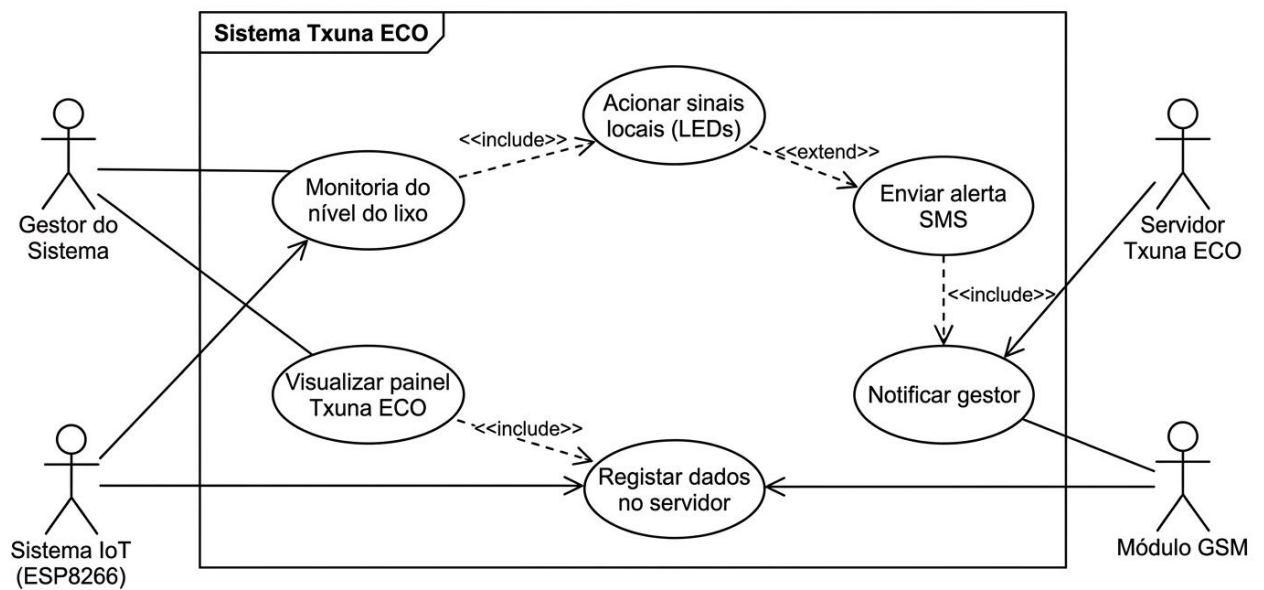


Figura 8: Diagrama de Casos de USO

4.5.3. Diagrama de Classes

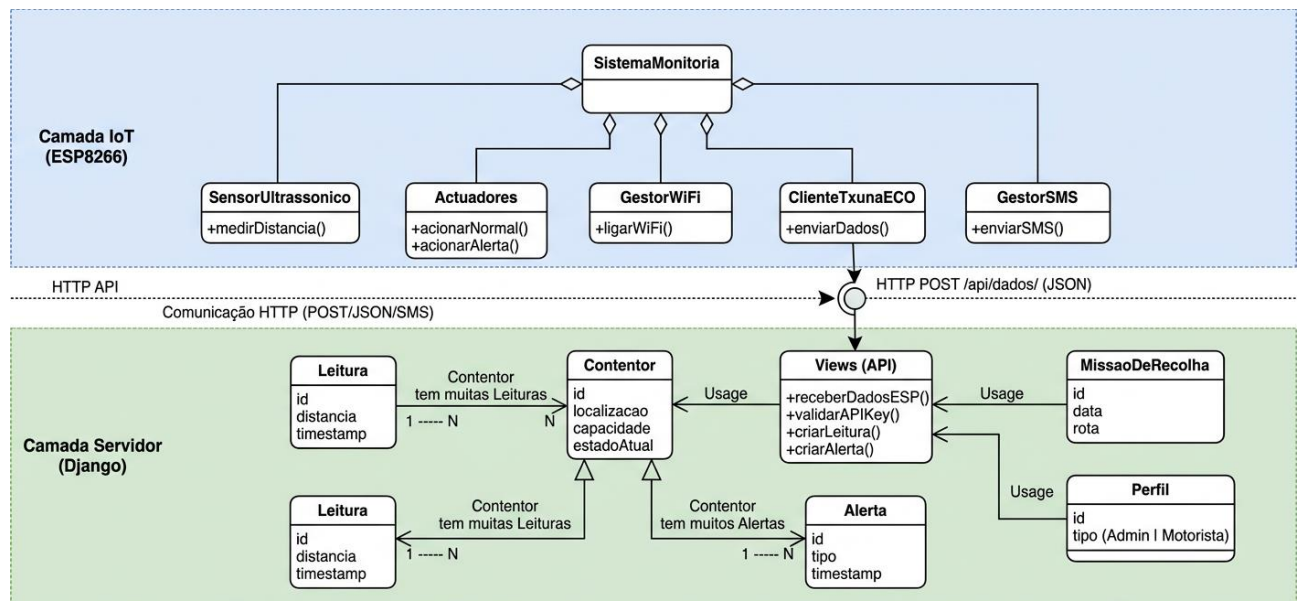


Figura 9: Diagrama de Classes

4.5.4. Diagrama de Sequência de Eventos

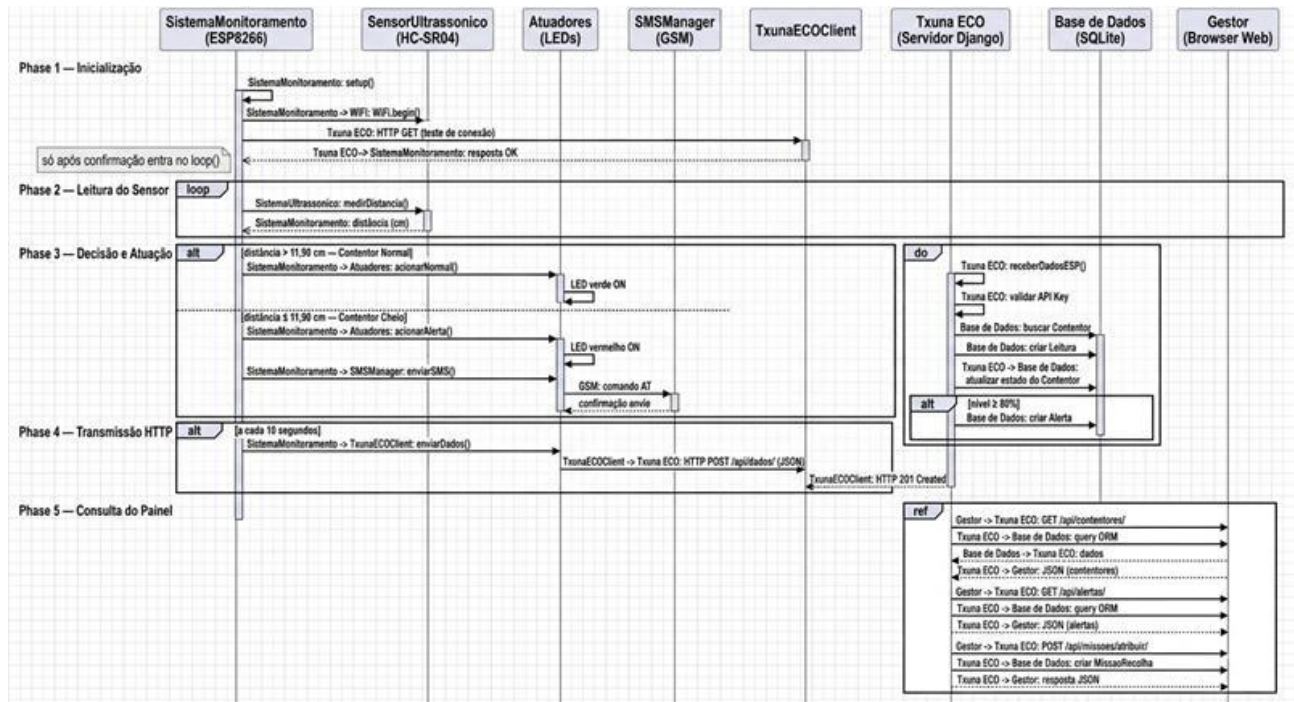


Figura 10: Diagrama de Sequência de Eventos

4.5.5. Diagrama de Estados

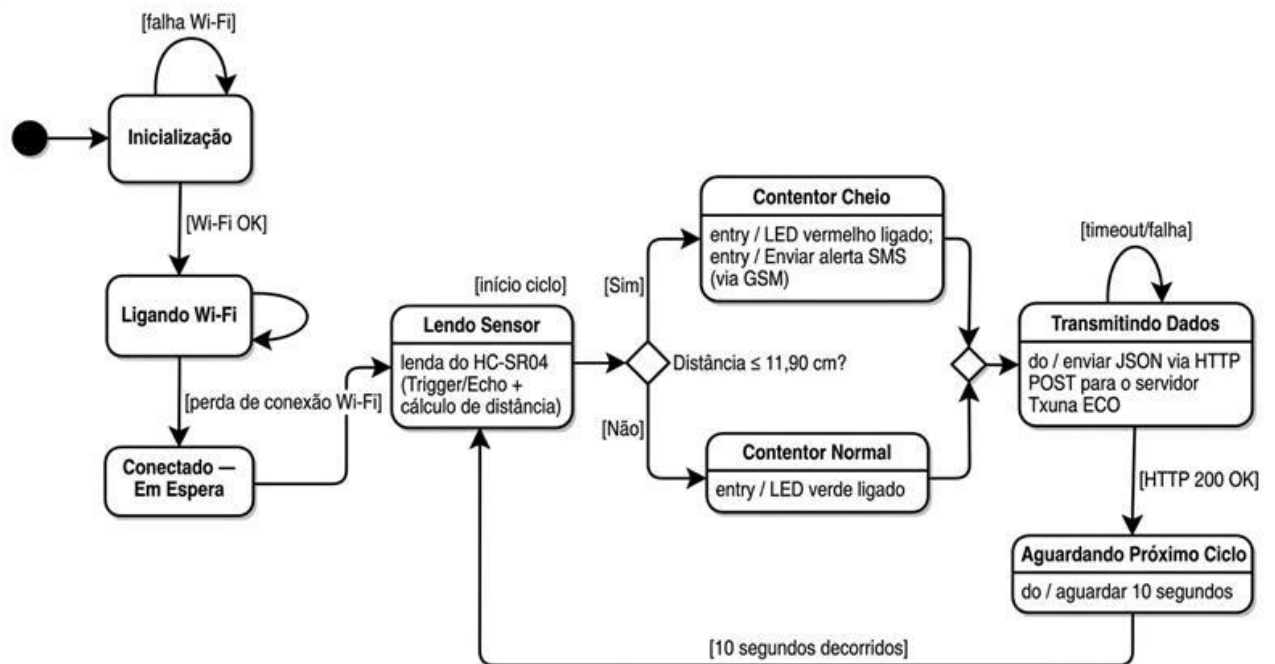


Figura 11: Diagrama de casos de Estados

4.5.6. Arquitectura do Sistema

A arquitectura proposta para a solução é estruturada em três camadas principais: camada de percepção, camada de rede, e camada de aplicação. A interacção entre estas camadas segue uma abordagem hierárquica, iniciando na base com a camada de percepção e culminando no topo, na camada de aplicação. Esta organização favorece o fluxo lógico e contínuo de dados, desde a recolha inicial até ao processamento final.

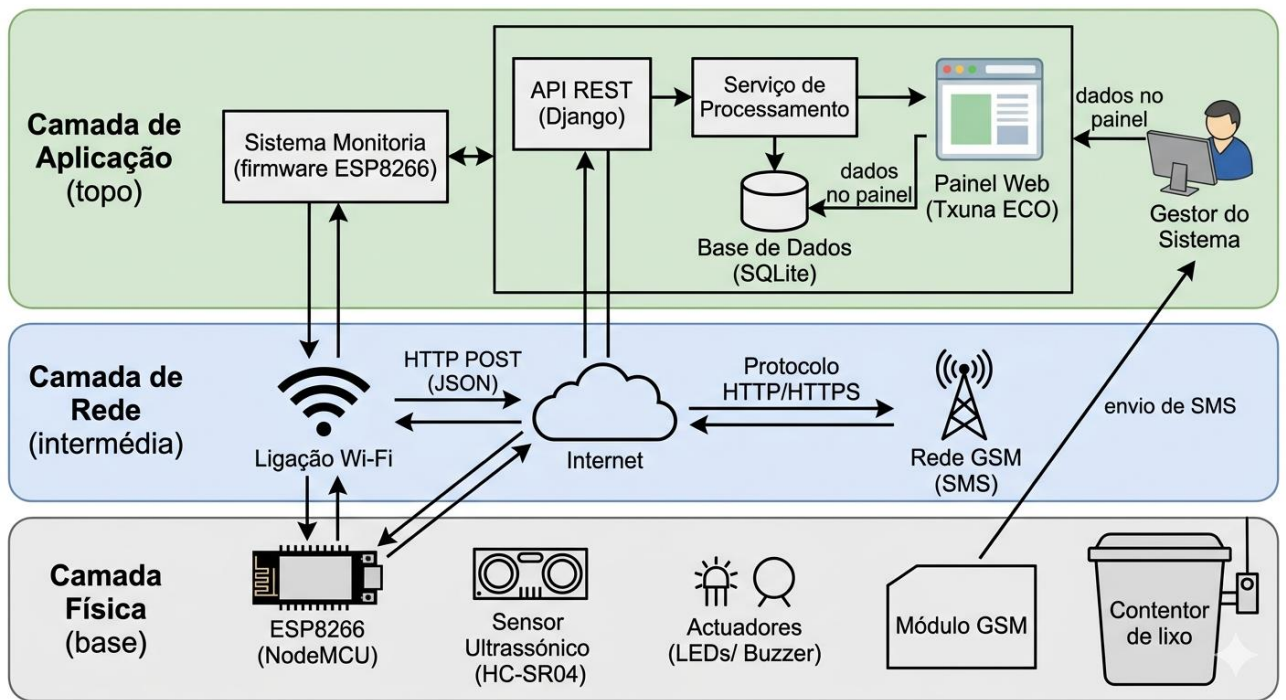


Figura 12: Arquitectura do modelo de solução

- **Camada de Percepção**

A camada de percepção constitui o ponto inicial do sistema, responsável pela recolha de dados do ambiente físico através de dispositivos especializados. Esta camada desempenha um papel essencial, pois converte grandezas físicas, como o nível de resíduos nos contentores, em dados digitais. Estes dados são fundamentais para alimentar as camadas superiores do sistema, garantindo uma operação baseada em informações em tempo real.

Esta camada divide-se em dois componentes principais: a componente física, que assegura a transmissão de sinais binários por canais de comunicação adequados, e a componente de percepção, que recorre a sensores e microcontroladores para captar e transformar as informações. Neste contexto, são utilizados sensores ultrassónicos para medir os níveis de resíduos, enquanto o microcontrolador NodeMCU ESP8266 processa os dados e envia-os à camada de rede.

Adicionalmente, esta camada é concebida para operar com eficiência energética, utilizando fontes sustentáveis, como painéis solares, para alimentar os dispositivos. Esta abordagem reduz custos operacionais e promove a sustentabilidade ambiental, aspectos cruciais num sistema de gestão de resíduos.

- **Camada de Rede**

A camada de rede é responsável pela transmissão dos dados captados pela camada de percepção para a camada de aplicação. Esta camada actua como um elo de ligação, assegurando que as informações sejam transferidas de forma eficiente e sem perdas, utilizando tecnologias de comunicação sem fios adequadas ao contexto urbano e às condições operacionais do sistema.

Para cumprir a sua função, a camada de rede utiliza prioritariamente a tecnologia GSM/GPRS, que permite a comunicação directa com a plataforma web Txuna ECO através das redes de telefonia móvel, assegurando maior cobertura geográfica e independência de infra-estruturas locais.

De forma complementar, o protocolo IEEE 802.11 (Wi-Fi) pode ser utilizado em cenários específicos, como ambientes controlados ou fases de teste, oferecendo conectividade estável e de alta velocidade quando disponível.

Adicionalmente, esta camada é concebida para ser escalável, podendo suportar um aumento no número de dispositivos conectados sem comprometer o desempenho do sistema. Esta característica é essencial para acompanhar o crescimento do sistema, caso mais contentores sejam adicionados à rede no futuro.

- **Camada de Aplicação**

A camada de aplicação é a última etapa do sistema, sendo responsável pelo armazenamento, processamento e análise dos dados transmitidos pela camada de rede. Este nível é responsável por transformar os dados brutos em informações úteis e acessíveis para os utilizadores finais, permitindo uma tomada de decisão informada.

Nesta camada, os dados são armazenados em plataformas na nuvem, o que garante acessibilidade a partir de qualquer local, bem como segurança e flexibilidade no processamento. Após o armazenamento, os dados são analisados e apresentados por meio de gráficos e relatórios num painel de controlo acessível por dispositivos móveis e computadores.

Finalmente, a camada de aplicação facilita a monitorização em tempo real do estado dos contentores e a optimização das rotas de recolha. Esta funcionalidade contribui para uma gestão mais eficaz e económica dos resíduos, promovendo a sustentabilidade e reduzindo os custos operacionais das frotas de recolha.

4.5.7. Modelo de Funcionamento

O modelo de funcionamento do sistema proposto para a gestão de resíduos sólidos urbanos baseia-se na integração e comunicação entre três componentes principais: os dispositivos de recolha de dados (sensores e microcontroladores), a transmissão de informações através de rede sem fios, e a plataforma

de aplicação que processa e apresenta os dados. Este fluxo de dados é contínuo e automatizado, permitindo uma gestão eficiente e eficaz dos resíduos na cidade de Maputo.

- **Captura e Transmissão de Dados**

O funcionamento inicia-se na camada de percepção, onde os sensores ultrassónicos, instalados nos contentores, monitorizam continuamente o nível de resíduos. Estes sensores enviam as informações para o microcontrolador NodeMCU ESP8266, que processa os dados e os prepara para a transmissão.

A comunicação com a plataforma web Txuna ECO é efectuada preferencialmente através da tecnologia GSM/GPRS, utilizando um módulo de comunicação móvel, o que permite o envio dos dados em tempo real, independentemente da disponibilidade de redes Wi-Fi no local de instalação.

Em contextos específicos, como testes laboratoriais ou ambientes com conectividade local assegurada, a transmissão pode igualmente ser realizada através de tecnologia Wi-Fi baseada no protocolo IEEE 802.11.

Este processo de transmissão de dados em tempo real garante que as informações relativas ao estado dos contentores se encontrem permanentemente actualizadas e prontamente disponíveis para análise e tomada de decisão na plataforma Txuna ECO.

- **Processamento e Análise de Dados**

Após a transmissão para a camada de rede, os dados são enviados para a plataforma Txuna ECO, onde são armazenados e processados. A plataforma Txuna ECO, por exemplo, permite acompanhar os níveis de resíduos e gerar relatórios detalhados sobre a quantidade de resíduos nos contentores em diferentes zonas da cidade. Além disso, a plataforma efectua a análise dos dados, ajudando a identificar padrões, como os períodos de maior acumulação de resíduos e as áreas que necessitam de maior frequência de recolha.

- **Decisão e Acção**

Com base na análise efectuada na camada de aplicação, o sistema envia alertas automáticos para os operadores de recolha quando o nível de resíduos em qualquer contentor ultrapassar o limite predefinido. Adicionalmente, as informações sobre os níveis de resíduos e a localização dos contentores são disponibilizadas no Painel de Controlo Móvel, permitindo que os motoristas da frota de recolha optimizem as rotas, evitando desperdícios de tempo e combustível. Este processo de optimização das rotas também contribui para a redução do impacto ambiental, pois diminui o número de viagens desnecessárias.

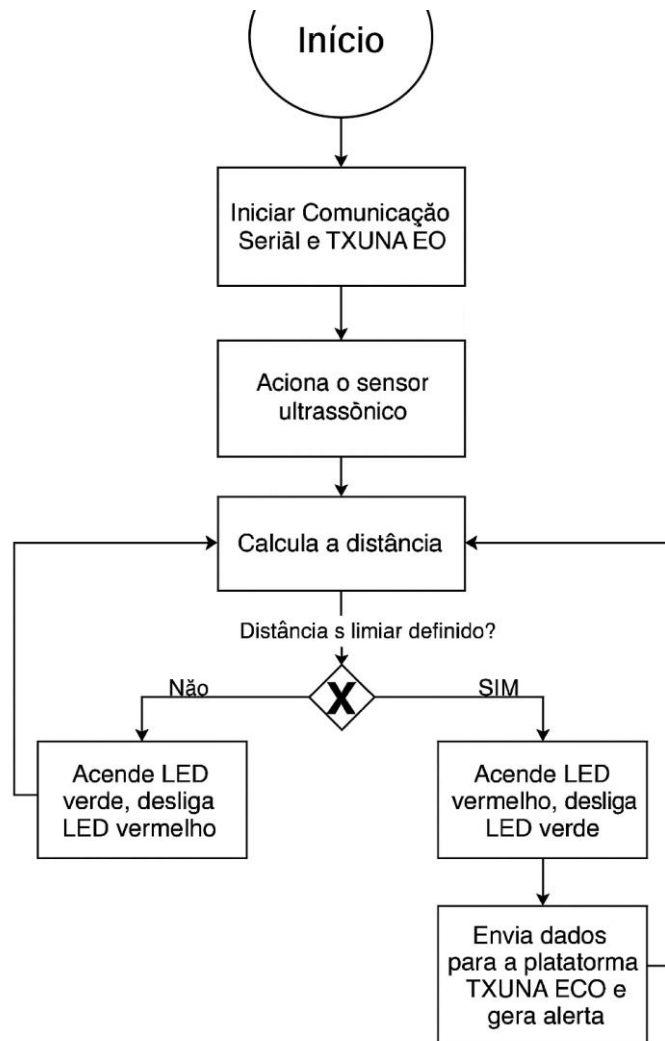


Figura 13: Fluxo de Trabalho

4.6. Plataforma Web Txuna ECO (Django)

4.6.1. Fundamentos Técnicos da Plataforma Txuna ECO

A plataforma Txuna ECO constitui a componente central de armazenamento, processamento e visualização dos dados recolhidos pelos sensores IoT instalados nos contentores inteligentes. A solução foi desenvolvida como uma plataforma própria e autónoma, implementada com recurso ao framework Django (Python), garantindo ao sistema total controlo sobre os dados e elevada flexibilidade para personalização da lógica de negócio.

A aplicação pode ser executada localmente ou num servidor dedicado, expondo uma API REST responsável por receber as medições transmitidas pelo microcontrolador ESP8266 NodeMCU, armazená-las numa base de dados relacional (SQLite em ambiente de desenvolvimento, com suporte a PostgreSQL em produção), e disponibilizar um painel de controlo web acessível a partir de qualquer dispositivo com ligação à internet.

A adopção de uma solução própria permitiu reforçar a autonomia, privacidade e segurança dos dados, evitando dependências de serviços externos sujeitos a limitações de planos gratuitos, quotas de tráfego ou variações de conectividade. Além disso, a plataforma possibilita personalização avançada, adaptando-se às necessidades específicas da gestão de resíduos sólidos urbanos da Cidade de Maputo.

4.6.2. Arquitectura e Componentes Técnicos da Plataforma Txuna ECO

O Txuna ECO foi concebido como uma solução web modular e extensível, estruturada de acordo com o padrão arquitectural MTV (Model-Template-View) do Django. A plataforma encontra-se organizada nos seguintes módulos principais:

a) Modelos de Dados (Models)

Definem as entidades nucleares do sistema, incluindo:

- Contentor: atributos como nome, coordenadas GPS, nível percentual, estado e tipo.
- Leitura: registo histórico das medições realizadas pelos sensores (com timestamp).
- Alerta: notificações de contentores em estado crítico, com estado de resolução.
- MissaoRecolha: conjuntos de contentores atribuídos a motoristas, incluindo waypoints, estado e hora de execução.
- Perfil: extensão do utilizador Django, diferenciando Administrador e Motorista.

b) API REST (Views)

A camada de views expõe uma API RESTful que integra o sistema IoT. Entre os principais endpoints encontram-se:

- POST /api/dados/ – recepção de medições enviadas pelo ESP8266.
- GET /api/contentores/ – listagem e estado dos contentores.
- GET /api/alertas/ – listagem de alertas activos.
- GET /api/analytics/ – dados analíticos para construção de gráficos.
- POST /api/missoes/atribuir/ – atribuição de missões a motoristas.
- GET/POST /api/usuarios/gerir/ – gestão de utilizadores e perfis.

c) Painel de Controlo Web (Templates/Dashboard)

O painel de controlo é renderizado pelo motor de templates do Django e oferece:

- mapa em tempo real com a localização e o estado de cada contentor (códigos de cor: verde <50%, amarelo 50–80%, vermelho >80%);

- gráficos de evolução histórica dos níveis de resíduos;
- listagem de alertas activos e classificação dos contentores com mais notificações (Top 5);
- módulos de gestão de missões e utilizadores (reservado ao Administrador).

4.6.3. Integração Técnica com o Sistema IoT

A plataforma Txuna ECO integra-se directamente com os componentes físicos do sistema IoT:

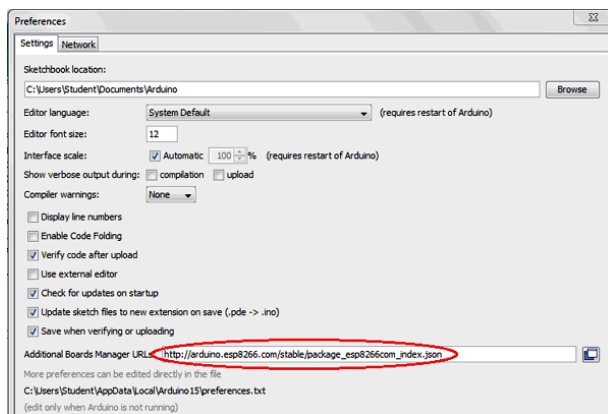
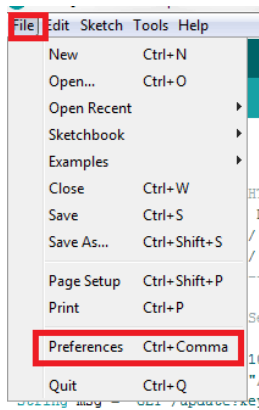
- recebe as leituras transmitidas pelo ESP8266 via HTTP POST;
- valida a chave de API do contentor;
- regista a leitura na base de dados;
- actualiza o estado operacional do contentor;
- cria automaticamente um alerta quando o nível ultrapassa o limiar definido (80%);
- disponibiliza a informação em tempo real no painel de controlo.

4.6.4. Configuração da Plataforma Web Txuna ECO (Django)

A configuração da plataforma web Txuna ECO constitui um passo essencial para a integração do sistema IoT com a camada de aplicação. A plataforma foi desenvolvida com base no framework Django (Python), permitindo o armazenamento, processamento e visualização de dados em tempo real de forma autónoma, sem dependência de serviços de terceiros. Para colocar a aplicação em funcionamento, o utilizador deverá instalar as dependências do projecto e iniciar o servidor de desenvolvimento local. A plataforma Txuna ECO está organizada de acordo com a estrutura padrão do Django, contendo o módulo principal **txuna_eco** (configurações gerais), o módulo **core** (lógica de negócio, modelos e vistas), e a base de dados SQLite. Para instalar as dependências, executa-se o comando *pip install django djangorestframework corsheaders* no ambiente Python. O servidor é iniciado com *python manage.py runserver*, disponibilizando a aplicação no endereço local.

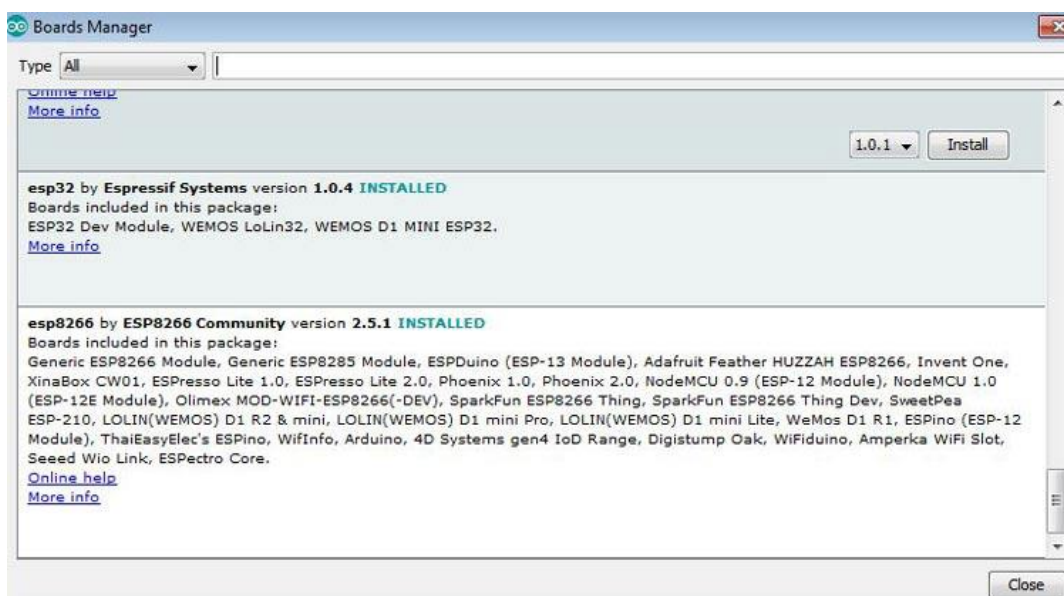
Concluída a configuração do ambiente Django, o passo seguinte consiste em preparar o hardware e programar o ESP8266 NodeMCU para comunicar com a plataforma. A programação do microcontrolador é realizada com recurso ao Arduino IDE, e o ESP8266 envia os dados via HTTP POST directamente para o endpoint da aplicação Django local ou alojada num servidor próprio. Para configurar o Arduino IDE para o ESP8266, o utilizador deve seguir os passos abaixo:

No Arduino IDE, o utilizador deverá aceder a **Arquivo > Preferências** e, no campo "**Additional Board Manager URL**", inserir o seguinte endereço URL:



https://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json. Em seguida, clicar em "OK".

De seguida, aceder a Ferramentas > Placa > Gestor de Placas. No campo de pesquisa, digitar "ESP8266" e seleccionar a versão mais recente da biblioteca correspondente. Clicar em "Instalar" para adicionar o suporte às placas ESP.



Após a instalação, deverá retornar a Ferramentas > Placa e selecionar "NodeMCU 1.0 (ESP-12E Module)" como a placa a ser programada.

4.6.5. Programação do ESP8266 NodeMCU para Integração com a Plataforma Django

A programação do ESP8266 NodeMCU é desenvolvida em linguagem C e compilada no ambiente Arduino IDE, sendo o firmware armazenado diretamente na memória interna do módulo para garantir operação autónoma. A comunicação com o servidor Txuna ECO é realizada através da ligação Wi-Fi integrada no próprio ESP8266, utilizando o protocolo HTTP. Para tal, recorre-se à biblioteca ESP8266HTTPClient.h, que disponibiliza as funções necessárias para o envio de dados via requisições HTTP POST para o endpoint /api/dados/.

O firmware implementa toda a lógica de aquisição e processamento dos dados, incluindo a configuração dos pinos, o cálculo da distância e o controlo dos LEDs, seguindo a arquitetura definida para o sistema. A integração com a plataforma Txuna ECO, bem como os excertos relevantes do código, encontra-se descrita na subsecção anterior (Configuração da Plataforma Web Txuna ECO).

Antes do desenvolvimento do firmware, é necessário instalar e configurar a biblioteca do ESP8266 no Arduino IDE através do gestor de placas. Concluída esta etapa, o ambiente fica preparado para a escrita, compilação e upload do código para o NodeMCU, permitindo a integração do módulo no projeto IoT e viabilizando a recolha e transmissão de dados para o servidor Txuna ECO.

1. Importação das bibliotecas

Para estabelecer a ligação entre o NodeMCU e o servidor Txuna ECO, são importadas as seguintes bibliotecas:

- ESP8266WiFi.h: fornece a funcionalidade de conectividade Wi-Fi para o módulo ESP8266.
- ESP8266HTTPClient.h: permite realizar requisições HTTP (GET/POST) a partir do ESP8266 para o servidor Txuna ECO.

```
#include <ESP8266WiFi.h>          // Biblioteca Wi-Fi do ESP8266
```

```
#include <ESP8266HTTPClient.h>    // Biblioteca HTTP para envio ao servidor Txuna ECO
```

2. Definição de Pinos

Para o funcionamento do projecto, é necessário definir os pinos que serão utilizados para ligar os sensores ultrassónicos e os LEDs ao ESP8266 NodeMCU. Neste caso, os pinos são configurados da seguinte forma:

```
const int trigPin1 = D1; // Pino de Trigger do sensor ultrassónico
```

```
const int echoPin1 = D2; // Pino de Echo do sensor ultrassónico
```

```
#define redled D3 // Pino do LED vermelho
```

```
#define grnled D4 // Pino do LED verde
```

3. Definição das Credenciais e Configuração do Servidor

O firmware requer apenas o endereço IP do servidor Txuna ECO (ou o seu nome de domínio), o número do porto e a chave de API interna do contentor, definida na plataforma Txuna ECO:

```
// Credenciais da rede Wi-Fi
```

```
char ssid[] = "ussene"; // Nome da rede Wi-Fi
```

```
char pass[] = "ussene12345"; // Palavra-passe da rede Wi-Fi
```

```
// Configuracao do servidor Txuna ECO
```

```
const char* server_url = "http://192.168.1.100:8000/api/dados/"; // Endpoint Django
```

```
int contentor_id = 1; // ID do contentor na base de dados Django
```

```
const char* api_key = "CHAVE_API_CONTENTOR"; // Chave de API do contentor no servidor Txuna ECO
```

4. Envio dos Dados para o Servidor Django

Os dados são enviados ao servidor TXUNA ECO através de um payload JSON via HTTP POST, conforme o seguinte exemplo:

```
if (currentMillis - startMillis >= period) {
```

```
    HTTPClient http;
```

```
    http.begin(server_url); // Endpoint do servidor TXUNA ECO
```

```
    http.addHeader("Content-Type", "application/json");
```

```
    String payload = "{\ "contentor_id\ ":" + String(contentor_id) +
```

```
        ,\ "distancia\ ":" + String(distance1) + ",\ "api_key\ ":"\ " + api_key +  
        "\ "}";
```

```
    int httpCode = http.POST(payload); // Envia dados ao servidor TXUNA ECO
```

```
    http.end();
```

```

        startMillis = currentMillis;

    }

```

O servidor TXUNA ECO, ao receber o payload JSON no endpoint */api/dados/*, valida a chave de API, regista a leitura na tabela *Leitura*, actualiza o estado do contentor e, caso o nível ultrapasse o limite de 80%, cria automaticamente um registo na tabela *Alerta*, desencadeando a notificação visível no painel de controlo.

5. Definição das Variáveis de Temporização

Definem-se as variáveis responsáveis pela temporização, que controlam o intervalo de 10 segundos entre os envios de dados para a plataforma TXUNA ECO.

```

// Variáveis de temporização

unsigned long startMillis;      // Marca o início do temporizador

unsigned long currentMillis;    // Tempo actual

const unsigned long period = 10000; // Intervalo de 10 segundos

```

6. Ligação com a Rede Wi-Fi

O ESP8266 deve estabelecer ligação à rede Wi-Fi usando a função *WiFi.begin()*, passando como parâmetros o SSID e a palavra-passe. O código verifica se a ligação foi bem-sucedida através de *WiFi.status()* e, uma vez ligado, imprime o endereço IP local no Monitor Serial.

```

WiFi.begin(ssid, pass); // Liga à rede Wi-Fi

// Verifica se a ligação Wi-Fi foi bem-sucedida

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {

    delay(500); // Aguarda 500 ms

    Serial.print("."); // Imprime um ponto no monitor serial enquanto aguarda

}

Serial.println("WiFi conectado!"); // Mensagem de sucesso

Serial.println(WiFi.localIP()); // Imprime o IP local do ESP8266

startMillis = millis(); // Armazena o tempo inicial para o controlo de intervalo

```

7. Cálculo da Distância com o Sensor Ultrassônico

Nesta etapa, o código interage com o sensor ultrassônico HC-SR04 para calcular a distância. Através de um pulso de 2 microssegundos enviado ao pino trigPin1 (Trigger), o sensor emite uma onda sonora, e a resposta é medida no pino echoPin1 (Echo). O tempo de retorno é utilizado para calcular a distância em centímetros.

```
// Envia o pulso de Trigger  
digitalWrite(trigPin1, LOW);  
delayMicroseconds(2); // Aguarda 2 microssegundos  
digitalWrite(trigPin1, HIGH);  
delayMicroseconds(10); // Pulso de 10 microssegundos  
digitalWrite(trigPin1, LOW);  
  
// Lê o tempo de retorno do pulso no pino Echo  
duration1 = pulseIn(echoPin1, HIGH);  
  
// Calcula a distância em centímetros  
  
distance1 = duration1 * 0.034 / 2; // Fórmula para converter tempo em distância
```

8. Controle dos LEDs (Normal ou Enchimento)

Após calcular a distância, é possível accionar os LEDs com base no valor obtido. Neste caso, a condição verifica se a distância é inferior ou igual a 4 cm, indicando um nível de enchimento, por exemplo. Os LEDs são acesos de acordo com essa condição.

```
// Se a distância for inferior ou igual a 4 cm, acende o LED vermelho  
  
if (distance1 <= 4) {  
  
    digitalWrite(D3, HIGH); // Acende o LED vermelho  
  
    digitalWrite(D4, LOW); // Apaga o LED verde  
  
} else {  
  
    digitalWrite(D4, HIGH); // Acende o LED verde  
  
    digitalWrite(D3, LOW); // Apaga o LED vermelho }
```

9. Envio dos Dados para a API Django

A cada 10 segundos (controlados pela variável `period`), a distância é enviada para a plataforma TXUNA ECO. O código utiliza o método `enviarDadosTxunaEco()`.

```
void enviarDadosTxunaEco() {  
  
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {  
  
        WiFiClient clientPost;  
  
        HTTPClient http;  
  
        http.begin(clientPost, txuna_server);  
  
        http.addHeader("Content-Type", "application/json");  
  
        // Construção do JSON com a distância real  
  
        String jsonData = "{";  
  
        jsonData += "\"api_key\": \"" + String(api_key) + "\",";  
  
        jsonData += "\"contentor_id\": " + String(contentor_id) + ",";  
  
        jsonData += "\"distancia\": " + String(distancia);  
  
        jsonData += "}";  
  
        Serial.print("Enviando para Txuna Eco: ");  
  
        Serial.println(jsonData);  
  
        int httpResponseCode = http.POST(jsonData);  
  
        if (httpResponseCode > 0) {  
  
            Serial.print(" Resposta HTTP: ");  
  
            Serial.println(httpResponseCode);  
  
        } else {  
  
            Serial.print("Erro no Envio: ");  
  
            Serial.println(http.errorToString(httpResponseCode).c_str());  
  
        }  
    }  
}
```

```

    http.end();

} else {

    Serial.println(" WiFi desconectado! Tentando reconectar...");

    WiFi.begin(ssid, pass);

}

}

```

4.7. Integração e Teste de Sistema

Durante o teste do protótipo, foi possível verificar que os componentes utilizados no sistema possuem potencial para garantir a continuidade dos três pilares do modelo clássico de segurança da informação: Confidencialidade, Integridade e Disponibilidade. A confiabilidade do sistema depende, entre outros, da manutenção dos sensores e da resistência a elementos e condições adversas. A exposição contínua à água, por exemplo, pode comprometer a eficácia das medições, afectando directamente a integridade e a precisão dos dados recolhidos.

O sensor ultrassónico utilizado no protótipo é de natureza analógica e possui uma carga resistiva, o que pode representar um desafio ao longo do tempo. A interacção constante com a água pode provocar oxidação nos componentes eléctricos, comprometendo progressivamente a precisão das medições. Esta degradação pode afectar negativamente a disponibilidade dos dados, uma vez que o sensor pode deixar de funcionar corretamente após um período de uso, interferindo na entrega de informações precisas para a nuvem e dificultando a confiabilidade do sistema.

No contexto da implementação prática do protótipo, foi utilizado o sensor ultrassónico HC-SR04, que não possui classificação de resistência ambiental (IP). Para mitigar esta limitação, recomenda-se a adopção de uma solução de encapsulamento físico, através de uma caixa de protecção robusta e vedada, capaz de minimizar a exposição à humidade, poeira e outros agentes externos.

Para uma implementação em ambiente real, recomenda-se a substituição do sensor por dispositivos com classificação mínima IP67 ou IP68, garantindo maior durabilidade, fiabilidade e conformidade com os requisitos de operação em ambientes externos.

Nos dois primeiros testes realizados, observou-se que o sensor apresentou, inicialmente, valores de medição erráticos, variando entre 96 e 1, antes de estabilizar em valores reais após alguns minutos. Esse comportamento indica que o sensor pode demorar a ajustar-se a condições ambientais específicas, como a temperatura e a humidade. No entanto, após o período de estabilização, os valores

normalizaram, demonstrando que, embora o sensor possa sofrer variações iniciais, este tem potencial para oferecer medições precisas e fiáveis quando operado por um período adequado.

Para mitigar a instabilidade inicial do sensor ultrassónico (valores erráticos no arranque), recomenda-se a implementação de mecanismos de software, tais como um período obrigatório de aquecimento (warm-up), filtragem por média móvel ou validação de leituras consecutivas antes do envio de dados à plataforma Txuna ECO, evitando alarmes falsos em ambiente de produção.

A Figura 14 apresenta o protótipo de um contentor vazio, demonstrando como os utilizadores podem depositar os resíduos com a certeza de que o contentor ainda possui capacidade disponível. A disponibilidade é sinalizada visualmente por meio de uma luz verde, indicando que o contentor está apto a receber mais resíduos.

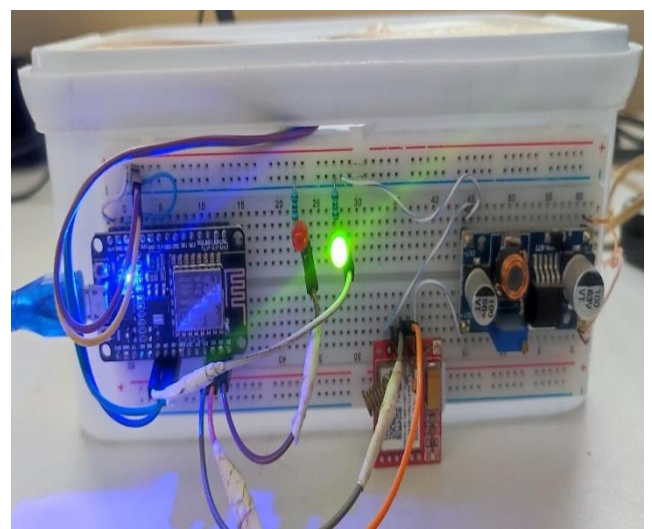


Figura 14: Protótipo do contentor vazio

A Figura 15 apresenta o protótipo de um contentor cheio, informando os utilizadores de que não devem depositar mais resíduos, pois o contentor atingiu a sua capacidade máxima. Esta condição é indicada por meio de uma sinalização visual com luz vermelha, que alerta que o contentor não está apto a receber mais resíduos.

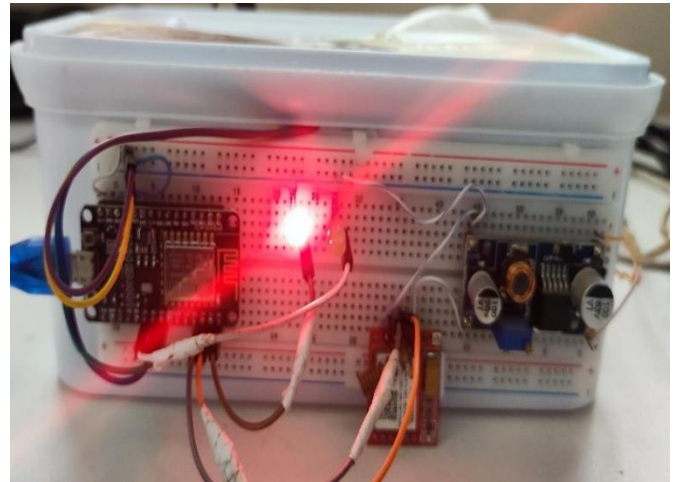


Figura 15: Protótipo do contentor cheio

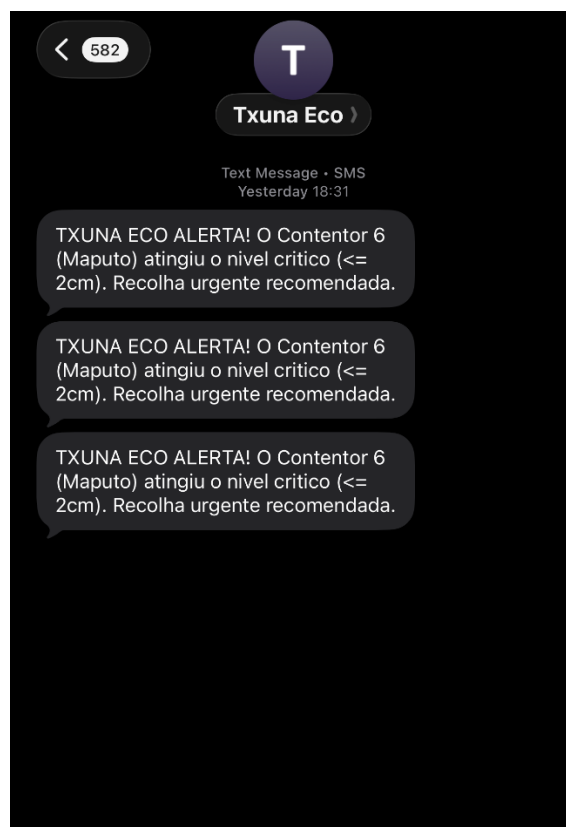


Figura 16: Alertas de contentor cheio

O protótipo de contentor utilizado possui altura total de 5 cm, sendo o limiar crítico de 4 cm equivalente a aproximadamente 80% da sua capacidade útil, valor utilizado para activar o alerta de contentor cheio.

4.8. Operação e Manutenção

4.8.1. Plano de Instalação do Sistema de Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos

A instalação do Sistema de Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos no local do estudo será realizada ao longo de um período de seis meses, conforme detalhado no Plano de Instalação apresentado na Tabela 9. Este plano inclui todas as etapas necessárias para a configuração e implementação do sistema, desde a preparação do local até a instalação final dos componentes e a execução dos testes de funcionamento.

Durante este período, serão efectuadas actividades como o mapeamento do local, a instalação dos dispositivos de monitorização e a integração do sistema com a infra-estrutura existente, garantindo que todos os processos estejam alinhados com os objectivos do projecto.

Tabela 9: Plano de Instalação

<i>Fase</i>	<i>Actividade</i>	<i>Descrição</i>	<i>Prazo</i>	<i>Responsável</i>
1. Planeamento e Preparação	Mapeamento dos pontos de instalação	Identificação e georreferenciação dos locais estratégicos para a colocação dos contentores inteligentes no Distrito Urbano de KaMpfumo, considerando a densidade populacional e o volume de resíduos gerado.	Mês 1 (Semanas 1-2)	Conselho Municipal da Cidade de Maputo (CMCM) e equipa técnica
	Aquisição de materiais	Compra de sensores ultrassónicos (HC-SR04), microcontroladores NodeMCU ESP8266, LEDs, painéis solares, baterias recarregáveis e contentores compatíveis.	Mês 1 (Semanas 3-4)	CMCM e Fornecedores
	Configuração inicial da plataforma Txuna ECO	Instalação e configuração do servidor Txuna ECO para armazenamento e visualização de dados,	Mês 1 (Semanas 3-4)	Equipa de TI e programadores

2. Desenvolvimento e Configuração	(Django)	configuração de APIs de escrita e leitura, e testes iniciais de conectividade.		
	Programação dos dispositivos	Desenvolvimento e carregamento do firmware nos NodeMCU ESP8266 usando o Arduino IDE, incluindo lógica para leitura de sensores, controlo de LEDs e envio de dados via GSM/GPRS ou Wi-Fi.	Mês 2 (Semanas 5-8)	Equipa de desenvolvimento de software
	Integração de hardware	Montagem dos sensores ultrassónicos, LEDs e painéis solares nos contentores, garantindo protecção contra intempéries e eficiência energética.	Mês 2 (Semanas 7-8)	Equipa técnica e engenheiros
	Testes unitários	Testes individuais dos componentes (sensores, LEDs, NodeMCU, conectividade GSM/GPRS ou Wi-Fi) para verificar o funcionamento e a precisão das medições.	Mês 3 (Semanas 9-10)	Equipa técnica e controlo de qualidade
3. Instalação no Local	Colocação dos contentores inteligentes	Posicionamento dos contentores nos pontos mapeados, fixação física e ligação à rede eléctrica (quando aplicável) ou activação de painéis solares.	Mês 3 (Semanas 11-12)	CMCM, ECOLIFE e equipa técnica
	Configuração	Ligação dos dispositivos	Mês 4	Equipa de TI e

	da rede Wi-Fi	NodeMCU às redes Wi-Fi locais, assegurando comunicação estável com o servidor Txuna ECO através do protocolo HTTP.	(Semanas 13-14)	ECOLIFE
4. Integração e Testes de Sistema	Integração com o painel de controlo	Configuração do painel de controlo móvel para visualização em tempo real do estado dos contentores (nível de resíduos, localização GPS, alertas).	Mês 4 (Semanas 15-16)	Equipa de TI e programadores
	Testes de integração	Testes completos do sistema, verificando a comunicação entre sensores, NodeMCU, plataforma Txuna ECO (Django) e painel de controlo, além da funcionalidade dos alertas automáticos (LEDs verde/vermelho).	Mês 5 (Semanas 17-18)	Equipa técnica e controlo de qualidade
5. Formação e Implementação	Formação de operadores	Capacitação de condutores, cantoneiros e gestores da ECOLIFE e CMCM no uso da painel de controlo e interpretação dos dados do sistema.	Mês 5 (Semanas 19-20)	Equipa de TI e consultores
	Campanha de sensibilização	Realização de campanhas educativas para os munícipes sobre o uso correcto dos contentores	Mês 5 (Semanas 19-20)	CMCM e ONGs parceiras

6. Validação e Lançamento		inteligentes e horários de deposição de resíduos.		
	Validação final	Verificação em campo do funcionamento do sistema em todos os pontos instalados, ajustando eventuais falhas.	Mês 6 (Semanas 21-22)	CMCM, ECOLIFE e equipa técnica
	Lançamento oficial	Implementação oficial do sistema, com monitorização inicial intensiva para garantir estabilidade.	Mês 6 (Semana 23)	CMCM e ECOLIFE

A Tabela 9 fornece uma visão detalhada das tarefas e prazos previstos para a instalação, incluindo a aquisição dos materiais necessários, a montagem dos sensores e a ligação à rede. Cada fase do processo será monitorizada para garantir que os prazos sejam cumpridos e que o sistema seja instalado de acordo com as especificações estabelecidas. A instalação será efectuada de forma a minimizar os impactos no funcionamento diário do local do estudo, assegurando uma transição suave para o novo sistema de gestão de resíduos.

4.8.2. Plano de Manutenção Preventiva do Sistema de Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos

Após a instalação, será fundamental garantir a operação contínua e eficiente do Sistema de Gestão de Recolha de Resíduos Sólidos Urbanos. Para isso, será implementado um Plano de Manutenção Preventiva, cujo objectivo é realizar verificações regulares para identificar problemas antes que estes afectem o funcionamento do sistema. O plano de manutenção está detalhado na Tabela 10, onde são descritos os componentes do sistema, os níveis de criticidade de cada um, e as acções necessárias para manter o sistema em pleno funcionamento.

Tabela 10: Plano de manutenção

<i>Componente</i>	<i>Criticidade</i>	<i>Actividade</i>	<i>Descrição</i>	<i>Frequência</i>	<i>Resp</i>
Sensores Ultrassónicos (HC-SR04)	Alta	Limpeza e verificação	Limpeza das superfícies dos sensores para remover poeira,	Mensal	Equipa técnica e ECOLIFE

	detritos ou humidade que possam afectar a precisão das medições. Verificação de ligações eléctricas para prevenir oxidação ou falhas.		
Calibração	Verificação da precisão das medições de distância, ajustando os sensores para garantir leituras consistentes.	Trimestral	Equipa técnica
Substituição	Substituição de sensores danificados ou com desempenho comprometido devido a exposição prolongada a condições adversas (ex.: humidade, calor).	Anual ou conforme necessário	Equipa técnica e CMCM

Microcontrolador NodeMCU ESP8266	Alta	Verificação de funcionamento	Teste da conectividade GSM/GPRS ou Wi-Fi e do processamento de dados, garantindo que o NodeMCU envie informações correctamente para a plataforma Txuna ECO (Django).	Bimestral	Equipa de TI
		Actualização de firmware	Actualização do firmware para corrigir erros, melhorar desempenho ou adicionar novas funcionalidades.	Semestral	Equipa de desenvolvimento de software
		Substituição	Substituição de unidades com falhas irreparáveis ou danificadas por factores externos (ex.: picos de energia).	Conforme necessário	Equipa técnica e CMCM
LEDs (Verde e	Média	Limpeza e	Limpeza dos LEDs para	Mensal	Equipa técnica e

Vermelho)

	teste	garantir visibilidade da sinalização. Teste para verificar o funcionamento correcto dos LEDs verde e vermelho com base nos níveis de enchimento.		ECOLIFE
	Substituição	Substituição de LEDs danificados ou com baixa intensidade luminosa.	Anual ou conforme necessário	Equipa técnica
Alta	Limpeza dos painéis solares	Remoção de poeira, folhas ou outros detritos que reduzam a eficiência de captação de energia solar.	Mensal	Equipa técnica
	Verificação de baterias	Inspeção das baterias recarregáveis para avaliar carga, ligações e sinais de desgaste ou corrosão.	Trimestral	Equipa técnica

Contentores		Substituição de baterias	Substituição de baterias com capacidade reduzida ou danificadas.	Bienal ou conforme necessário	Equipa técnica e CMCM
	Média	Inspecção estrutural	Verificação da integridade física dos contentores (ex.: fissuras, corrosão, danos causados pelo uso).	Trimestral	ECOLIFE e equipa técnica
		Limpeza	Limpeza interna e externa dos contentores para prevenir odores, proliferação de vectores e acumulação de resíduos.	Mensal	ECOLIFE
Conectividade GSM/GPRS ou Wi-Fi	Alta	Verificação de sinal	Teste da qualidade do sinal GSM/GPRS ou Wi-Fi nos pontos de instalação, ajustando antenas ou roteadores ou substituindo o módulo GSM, se	Bimestral	Equipa de TI

Plataforma Txuna (Django)	ECO		necessário.		
			Reconfiguração de rede	Reconfiguração de credenciais ou ajustes na rede Wi-Fi em caso de falhas de conectividade.	Conforme necessário
					Equipa de TI
Plataforma Txuna (Django)	ECO	Alta	Monitorização de desempenho	Verificação do funcionamento da plataforma Txuna ECO (Django), garantindo armazenamento e visualização correcta dos dados.	Mensal
					Equipa de TI
			Cópia de segurança de dados	Realização de cópias de segurança regulares dos dados armazenados para prevenir perdas em caso de falhas na plataforma.	Trimestral
Painel de Controlo					Equipa de TI
		Média	Teste de usabilidade	Verificação da funcionalidade do painel de controlo em dispositivos	Bimestral
					Equipa de TI e utilizadores finais (ECOLIFE)

		móveis e computadores, garantindo acesso fácil e visualização clara dos dados.		
	Actualização da interface	Actualização do painel de controlo para corrigir erros, melhorar usabilidade ou adicionar novas funcionalidades.	Semestral	Equipa de desenvolvimento de software

A manutenção preventiva incluirá tarefas como a substituição de peças desgastadas, a limpeza de sensores e dispositivos, e a verificação de ligações eléctricas e de rede. Para cada componente, será determinado se a intervenção necessária consiste numa simples limpeza, um ajuste, ou, em casos mais críticos, na substituição do componente.

O plano visa evitar falhas inesperadas, garantindo que o sistema de recolha de resíduos opere de forma eficiente e sem interrupções. A manutenção preventiva será realizada periodicamente, com a frequência dos procedimentos ajustada conforme a criticidade de cada item do sistema, assegurando a durabilidade e a funcionalidade do sistema a longo prazo.

Conclusões e Recomendações

O objectivo deste capítulo foi apresentar uma análise detalhada dos aspectos relacionados com a proposta de implementação de um sistema de gestão de resíduos sólidos baseado em Internet das Coisas (IoT) no Conselho Municipal da Cidade de Maputo. A partir dos objectivos específicos do estudo, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o processo e as tecnologias de recolha de resíduos sólidos, seguida de uma comparação das soluções viáveis para o contexto local. Adicionalmente, foi proposto um modelo baseado em IoT, que incluiu componentes de software e hardware, e desenvolvido um protótipo funcional para avaliar a viabilidade do modelo.

Importa destacar que as conclusões do presente estudo devem ser interpretadas à luz das limitações metodológicas, nomeadamente a dimensão reduzida da amostra utilizada na componente qualitativa. Assim, os resultados obtidos não pretendem generalizar a totalidade do sistema municipal, mas sim fornecer evidências exploratórias que suportam o desenvolvimento da solução proposta.

O capítulo também abordou a análise dos resultados obtidos a partir do protótipo, destacando como o uso de tecnologias IoT pode contribuir para a redução dos custos operacionais, para a melhoria da eficiência da recolha de resíduos e para a optimização das condições de gestão e organização do espaço urbano, contribuindo indirectamente para a melhoria das condições de salubridade urbana.

Foram apresentadas recomendações para aperfeiçoar a proposta e garantir que o sistema, caso venha a ser implementado, seja sustentável. A revisão bibliográfica revelou que os processos tradicionais de recolha enfrentam desafios significativos, especialmente nas grandes cidades de países em desenvolvimento, como Moçambique. A ausência de tecnologias avançadas e o predomínio de métodos manuais resultavam em ineficiências operacionais, custos elevados e limitações na capacidade de planeamento e monitorização do sistema.

Os estudos analisados indicaram que a integração da IoT pode melhorar a eficiência da recolha, reduzir os custos operacionais e contribuir indirectamente para a melhoria das condições de salubridade urbana, ao reduzir a acumulação de resíduos e apoiar uma recolha mais eficiente. A revisão evidenciou que a implementação de tecnologias como a IoT, associadas a soluções de monitorização em tempo real, representa um ponto de viragem na gestão de resíduos sólidos, tornando-a mais eficiente e mais sustentável.

Após a pesquisa e comparação de diferentes soluções de gestão de resíduos sólidos, identificou-se que o uso de sensores IoT, big data e plataformas integradas oferece uma solução viável e escalável para as necessidades do Conselho Municipal da Cidade de Maputo. A análise comparativa indicou que a automação da recolha, com base em dados em tempo real, é a chave para reduzir custos e aumentar a eficiência do processo de gestão de resíduos.

Com base nisso, concluiu-se que a solução IoT é a mais adequada para o Distrito Municipal de KaMpfumo, uma vez que se adapta à infra-estrutura existente e melhora a qualidade da gestão dos resíduos sólidos. O modelo proposto, que incluiu sensores inteligentes para monitorização e um software de gestão centralizada, foi concebido especificamente para a realidade deste distrito. Este modelo permitiria a recolha de dados em tempo real, possibilitando a optimização da alocação de recursos, ajuste de rotas e horários de recolha, e a melhoria da eficiência geral da operação.

Os resultados obtidos através do protótipo indicaram que o modelo proposto é adequado para o contexto local e oferece soluções práticas e escaláveis para os desafios enfrentados pelo Conselho Municipal da Cidade de Maputo na gestão de resíduos sólidos. O protótipo desenvolvido foi testado em ambiente simulado e demonstrou a viabilidade técnica da proposta. A integração dos sensores com o software de gestão revelou-se funcional, permitindo a monitorização em tempo real dos níveis de resíduos nos contentores e a optimização das rotas de recolha.

Os testes do protótipo confirmaram que o sistema proposto apresenta potencial para reduzir custos operacionais, aumentar a eficiência e melhorar a gestão de resíduos sólidos, caso venha a ser implementado. Assim, a simulação demonstrou que o sistema IoT pode ser aplicado de forma eficaz no contexto do Distrito Municipal de KaMpfumo, contribuindo para a melhoria da eficiência operacional e para a redução dos impactos ambientais, bem como para a melhoria das condições de organização e salubridade do espaço urbano.

A proposta de um sistema de gestão de resíduos sólidos baseado em IoT para o Conselho Municipal da Cidade de Maputo apresentou benefícios relevantes, incluindo a redução de custos operacionais, a melhoria da eficiência da recolha e a optimização das condições de gestão e organização do espaço urbano. O uso de sensores inteligentes e plataformas de gestão centralizada permite que os recursos sejam utilizados de forma mais eficiente, evitando desperdícios e tornando o processo de recolha mais ágil e adaptável às necessidades da cidade.

Com o modelo proposto e o protótipo funcional, constatou-se que a tecnologia IoT pode transformar a gestão de resíduos em Maputo, tornando-a mais sustentável, eficiente e adaptada à realidade local. A proposta contribui directamente para a redução dos custos operacionais, pois possibilita a

monitorização em tempo real, a optimização das rotas de recolha e a melhoria na alocação dos recursos. Ao reduzir o tempo de permanência de resíduos nas ruas, o sistema também pode contribuir indirectamente para a melhoria das condições de salubridade urbana, proporcionando um ambiente mais limpo e seguro para a população.

Conclui-se, portanto, que o sistema proposto não só apresenta potencial para melhorar a eficiência da gestão de resíduos, como também para contribuir de forma significativa para a optimização dos processos operacionais e para a redução dos custos associados à recolha e gestão dos resíduos, caso venha a ser implementado, promovendo uma organização mais eficiente e sustentável do espaço urbano.

6.1 Recomendações

Com base nos resultados obtidos e nos aspectos observados durante o desenvolvimento do sistema de gestão de resíduos sólidos baseado em IoT, apresentam-se as seguintes recomendações para melhorar a eficiência, a sustentabilidade e a expansão do sistema no Conselho Municipal da Cidade de Maputo:

- **À Comunidade Académica**

- Recomenda-se a realização de estudos aprofundados sobre o uso de tecnologias como LoRaWAN e NB-IoT no contexto de países em desenvolvimento, explorando as suas aplicações específicas na gestão de resíduos sólidos e avaliando a viabilidade económica e técnica destas tecnologias em cenários urbanos e rurais. Estes estudos devem incluir análises de custo-benefício detalhadas e comparações com países que já utilizam estas tecnologias.
- Recomenda-se a promoção de investigações sobre a segurança da informação em sistemas IoT, com especial foco na implementação de métodos avançados, como o uso de WebSockets e técnicas de criptografia. Sugere-se ainda a exploração de frameworks de segurança específicos para IoT, garantindo a privacidade e a integridade dos dados transmitidos no sistema de gestão de resíduos.
- Recomenda-se a realização de estudos que avaliem os impactos sócio-económicos e ambientais da utilização de sistemas IoT na gestão de resíduos sólidos. É importante que se utilizem indicadores como redução de custos operacionais, organização do espaço urbano, impacto na criação de empregos e mitigação dos impactos ambientais, assegurando uma análise robusta.
- Recomenda-se também que a comunidade académica incentive a integração da comunidade local na fase de planeamento e implementação dos sistemas IoT, assegurando que as soluções tecnológicas sejam viáveis e adequadas às realidades locais.

- **Ao Conselho Municipal da Cidade de Maputo**
 - Recomenda-se a substituição ou complementação do uso de redes Wi-Fi por tecnologias de longo alcance, como LoRaWAN ou NB-IoT, especialmente em áreas rurais e suburbanas. Esta substituição assegurará uma comunicação eficaz e fiável entre os dispositivos IoT a distâncias superiores a 10 km, reduzindo os custos de infraestrutura e manutenção.
 - Recomenda-se a implementação do sistema de gestão de resíduos sólidos de forma faseada, começando por áreas-piloto. Esta abordagem permitirá identificar ajustes necessários, testar a eficácia em pequena escala e facilitar a transição para uma implementação mais ampla e sustentável. Devem ser definidos indicadores de desempenho, como a redução de resíduos acumulados e a frequência de recolhas, para avaliar o sucesso em cada etapa.
 - Recomenda-se o estabelecimento e o fortalecimento de parcerias público-privadas, colaborando com empresas de tecnologia e comunicação para financiar a expansão do sistema, garantir a sua sustentabilidade e promover a integração contínua de inovações tecnológicas.
 - Recomenda-se a criação de programas regulares de capacitação para os técnicos municipais responsáveis pela operação e manutenção do sistema IoT. A formação deve incluir o uso de plataformas digitais, análise de dados em tempo real e actualização contínua sobre tecnologias emergentes, bem como técnicas de interacção com a comunidade.
- **Às Empresas Privadas e Startups de Tecnologia**
 - Recomenda-se o investimento no desenvolvimento de sensores e soluções adaptadas às condições locais de Maputo. Sensores de baixo custo, baixo consumo de energia e maior durabilidade em condições adversas devem ser priorizados para ampliar a eficácia do sistema nas áreas mais vulneráveis.
- **Às ONGs e à Sociedade Civil**
 - Recomenda-se a realização de campanhas de sensibilização ambiental junto da população, promovendo práticas sustentáveis, como a separação de resíduos na origem, e incentivando a participação activa dos cidadãos na gestão de resíduos sólidos. Estas campanhas podem incluir parcerias com escolas e organizações comunitárias, para garantir maior alcance e impacto.
- **Às Instituições de Financiamento e Doadores Internacionais**

- Recomenda-se a disponibilização de recursos financeiros para a expansão do sistema de gestão de resíduos sólidos baseado em IoT, priorizando áreas de maior vulnerabilidade social e ambiental.
- Recomenda-se ainda o investimento em inovação tecnológica contínua, como sensores inteligentes e algoritmos de análise preditiva, que permitam adaptar o sistema às necessidades locais de forma dinâmica e eficiente.

Referências Bibliográficas

- AGÊNCIA DE INFORMAÇÃO DE MOÇAMBIQUE. (2024). "Impactos Ambientais da Lixeira de Hulene: Estudos e Análises Recentes." *Notícias Ambientais de Moçambique*.
- AGÊNCIA NACIONAL DE GESTÃO DE RESÍDUOS. (2019). Relatório sobre os Impactos Ambientais da Gestão de Resíduos em Áreas Urbanas. *Agência Nacional de Gestão de Resíduos, Moçambique*.
- ALMEIDA, J. (2024). Gestão de resíduos perigosos e seus impactos ambientais: Um estudo sobre práticas sustentáveis. Editora Ambiental.
- ALBUQUERQUE, J. P. (2015). Metodologia Científica: Como Realizar Pesquisa Científica. Editora Atlas.
- ASSOCIAÇÃO MOÇAMBICANA DE GESTÃO DE RESÍDUOS. (2023). "Educação e Sensibilização para a Gestão de Resíduos em Moçambique". Associação Moçambicana de Gestão de Resíduos, Moçambique.
- ASSOCIAÇÃO MOÇAMBICANA DE RECICLAGEM. (2017). Estratégia de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: Propostas e desafios para Moçambique. Associação Moçambicana de Reciclagem.
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. (2010). The Internet of Things: A Survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805.
- BARETHA, S.; BHARATHI, P. (2020). IoT-based Waste Management: A Review of Applications and Future Directions. *Sustainable Cities and Society*, 53, 101911.
- BARDIN, L. (2011). Análise de Conteúdo. Edições 70.
- BANCO MUNDIAL. (2022). "Financiamento da Gestão de Resíduos: Desafios e Soluções para os Países em Desenvolvimento". *Banco Mundial*.
- BANCO MUNDIAL. (2023). "Relatório sobre a gestão de resíduos urbanos em Moçambique." [Relatório sobre gestão de resíduos sólidos no contexto de países em desenvolvimento]. *Banco Mundial*.
- BRYMAN, A. (2016). Social Research Methods. *Oxford University Press*.
- COSTA, M. (2023). Economia circular e gestão de resíduos sólidos: Alternativas sustentáveis para a conservação de recursos naturais. *Editora Verde*.
- CONSELHO MUNICIPAL DA CIDADE DE MAPUTO (CMCM). (2023). Relatório anual de gestão de resíduos sólidos urbanos.

- CONSELHO MUNICIPAL DA CIDADE DE MAPUTO (CMCM). (2024). Políticas públicas para a gestão de resíduos sólidos urbanos em Maputo.
- CRESWELL, J. W. (2013). Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches. *SAGE Publications*.
- FILHO, A. (2016). A Internet das Coisas e Suas Implicações Tecnológicas. Rio de Janeiro: *Editora Ciência e Tecnologia*.
- FERREIRA, J., e AMARAL, T. (2021). "IoT in Waste Management: Case Studies from Emerging Economies." *Smart Cities Journal*, 18(1), 65-78.
- FERREIRA, L., e COSTA, M. (2022). Classificação e gestão de resíduos: Uma abordagem prática para a compostagem e reciclagem. *EcoEditora*.
- GARCÍA, P., et al. (2022). "IoT and Blockchain: Emerging Technologies for Smart Waste Management Systems." *Environmental Technology and Innovation*, 10, 14-28.
- GEE, J. P. (2014). An Introduction to Discourse Analysis: *Theory and Method*. Routledge.
- GONÇALVES, A., e NHAMO, L. (2023). A dinâmica social e económica do Distrito de KaMpfumo em Maputo: Desafios e perspectivas. *Jornal de Estudos Urbanos*, 12(3), 45-59.
- GUBBI, J.; PALLI, P.; SUNDARAM, S.; GOMATHI, S.; GUPTA, R.; MA, X. (2013). Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660.
- HORTA, M. (2023). A contribuição do sector privado para a gestão de resíduos sólidos na cidade de Maputo. *Revista de Gestão Ambiental*, 15(2), 88-97.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA. (2023). Censo populacional da cidade de Maputo. *Instituto Nacional de Estatística*.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTATÍSTICA DE MOÇAMBIQUE. (2022). Análise de Dados Demográficos e Socioeconômicos. *Instituto Nacional de Estatística, Moçambique*.
- IPEA (Instituto de Pesquisa Económica Aplicada). (2021). Compostagem como alternativa para a gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Brasília: *IPEA*.
- KAMBLE, S. S.; GUNASEKARAN, A.; DHONE, R. (2019). A Comprehensive Review on IoT in Waste Management Systems. *Journal of Cleaner Production*, 217, 1053-1066.

- KHAN, M.; LEE, W.; ASLAM, M.; PARK, S.; KIM, S. (2020). IoT-based Smart Waste Management System: *A Survey. IEEE Access*, 8, 126276-126285.
- KERLINGER, F. N. (1986). Foundations of Behavioral Research. Holt, Rinehart and Winston.
- KUMAR, N.; MEHTA, D.; PANDYA, S.; YADAV, S. (2020). Recent Trends and Applications of IoT in Waste Management: A Review. *Materials Today: Proceedings*, 27(1), 1152-1157.
- KVALE, S., e BRINKMANN, S. (2015). InterViews: Learning the Craft of Qualitative Research Interviewing. *SAGE Publications*.
- LIU, J.; HUANG, Z.; ZHANG, Y. (2019). An Improved IoT Architecture for Waste Management System Using Big Data. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 16(7), 2997-3004.
- MABOTE, F. (2020). "Challenges in Solid Waste Management in Maputo: Current Trends and Perspectives." *Journal of Urban Planning and Development*, 36(2), 88-102.
- MINISTÉRIO DA ADMINISTRAÇÃO ESTATAL E FUNÇÃO PÚBLICA. (2021). Relatório sobre Custos de Operação da Gestão de Resíduos no Sector Público. *Ministério da Administração Estatal e Função Pública, Moçambique*.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. (2023). Relatório Anual de Doenças Transmitidas por Resíduos Sólidos. *Ministério da Saúde, Moçambique*.
- MINISTÉRIO DA TERRA E AMBIENTE, Moçambique. (2016). Relatório sobre a gestão de resíduos sólidos urbanos em Moçambique. *Ministério da Terra e Ambiente*.
- MINISTÉRIO DA TERRA E AMBIENTE. (2022). Plano Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos. *Ministério da Terra e Ambiente, Moçambique*.
- MICOA. (2023). Política Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos em Moçambique. *Ministério para a Coordenação da Ação Ambiental*.
- MENDES, T. (2023). Práticas de compostagem como solução sustentável para resíduos orgânicos. *Editora Ambiental*.
- MONTERO, C.; JIMÉNEZ, D.; JARA, A. (2019). Smart Waste Management System for Urban Areas: A Case Study of Barcelona, Spain. *IEEE Latin America Transactions*, 17(7), 1073-1079.
- MOTA, J., e MACHADO, P. (2021). "Estudo sobre os impactos da gestão inadequada de resíduos sólidos urbanos em Maputo." *Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique*.

- MWANGI, L. (2022). "Biogas Technologies in Waste Management: Case Studies from Kenya." *Renewable Energy Journal*, 24(4), 200-214.
- NKOSI, M. (2021). "Challenges and Solutions in Solid Waste Management in South Africa." *African Environmental Review*, 12(2), 100-110.
- OLIVEIRA, A., et al. (2022). Gestão eficiente de resíduos sólidos urbanos: Benefícios ambientais e socioeconômicos. *Editora Sustentável*.
- PATTON, M. Q. (2015). Qualitative Research & Evaluation Methods: Integrating Theory and Practice. *SAGE Publications*.
- PINTO, C., e CARVALHO, S. (2022). "The Limitations of Conventional Waste Management in Mozambique: Case Studies." *Journal of Environmental Science and Management*, 21(4), 157-165.
- ROBSON, C., e MCCARTAN, K. (2016). Real World Research. 4ª edição. Wiley.
- RODRIGUES, S., e LIMA, F. (2021). "Technological Advances in Waste Management Systems: IoT Applications." *Sustainability*, 13(8), 1306.
- RYERSON, G., e TOLEDO, R. (2020). "Smart Waste Systems: Leveraging IoT for Sustainable Urban Living." *Smart Cities Technology Review*, 6(1), 8-17.
- SANTOS, A., e FERREIRA, E. (2023). "A gestão eficiente dos resíduos sólidos urbanos na cidade de Maputo." *Revista Moçambicana de Engenharia*, 18(4), 102-118.
- SILVA, J. (2023). O impacto da poluição no ambiente urbano e alternativas de gestão de resíduos. *Editora Ecologia*.
- SILVA, M., et al. (2022). "Análise do Impacto Ambiental da Lixeira de Hulene". *Revista Brasileira de Gestão Ambiental*, 25(3), 100-115.
- SOUSA, A. (2024). "A gestão de resíduos urbanos em Maputo: Desafios, soluções e o papel das tecnologias emergentes." *Jornal de Gestão Pública*, 8(2), 10-28.
- SOUSA, J., e FERNANDES, M. (2023). "Tecnologias Emergentes para Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos." *Engenharia Ambiental*, 17(5), 242-257.

Apêndice 1: Guião das Entrevistas

O apêndice 1 apresenta o guião estruturado utilizado nas entrevistas formais conduzidas com funcionários do Departamento de Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos do Conselho Municipal da Cidade de Maputo e da empresa ECOLIFE, entre 10 e 17 de Maio de 2024. As perguntas foram organizadas por temas com o objectivo de compreender o sistema actual de gestão de resíduos sólidos.

1. Introdução

- Apresentação do entrevistador e dos objectivos da pesquisa.
- Confirmação do consentimento para gravação (se aplicável).

2. Formas de Recolha de Resíduos Sólidos

- Quais são os métodos de recolha actualmente utilizados (e.g., porta-a-porta, pontos de recolha, recolha selectiva)?
- Como é determinada a frequência da recolha em diferentes bairros?
- Quais são os principais desafios operacionais enfrentados na recolha?

3. Contentores

- Quantos contentores estão disponíveis na cidade, e quais são seus tipos (e.g., metálicos, plásticos) e capacidades?
- Como é feita a manutenção e reposição dos contentores?
- Há problemas frequentes de superlotação ou danos aos contentores?

4. Veículos

- Quantos veículos são utilizados para a recolha de resíduos? Quais são seus tipos e capacidades?
- Como é planeada a logística das rotas de recolha?
- Quais são os principais problemas relacionados com a frota de veículos (e.g., manutenção, capacidade insuficiente)?

5. Observações Finais

- Quais são as principais sugestões para melhorar o sistema de gestão de resíduos sólidos?
- Há interesse em adoptar tecnologias como IoT para optimizar a recolha?

Apêndice 2: Relatórios de Observação

O apêndice 2 apresenta os resultados das observações não participativas realizadas nos bairros de Polana Caniço, Maxaquene e Mafalala, entre 20 de Maio e 3 de Junho de 2024.

O objectivo foi identificar dificuldades operacionais na gestão de resíduos sólidos.

• Polana Caniço

- **Observação:** Contentores frequentemente superlotados, com resíduos espalhados ao redor. Estacionamento irregular dificulta acesso dos veículos de recolha.
- **Tempo Médio de Recolha:** 15 minutos por ponto, devido à desorganização dos resíduos.
- **Problemas:** Falta de conscientização para separação de resíduos; escassez de eco-pontos.

• Maxaquene

- **Observação:** Recolha porta-a-porta mais comum; presença de lixeiras improvisadas.
- **Tempo Médio de Recolha:** 12 minutos por ponto.
- **Problemas:** Atrasos na recolha; acúmulo de resíduos orgânicos.

• Mafalala

- **Observação:** Contentores insuficientes; sem separação de resíduos.
- **Tempo Médio de Recolha:** 18 minutos por ponto, devido a obstáculos físicos.
- **Problemas:** Baixa frequência de recolha; presença de vectores (ratos, mosquitos).

Apêndice 3: Resumo da Análise Documental

O apêndice 3 resume os principais pontos do Plano Director para a Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos na Cidade de Maputo, consultado para fundamentar o estudo.

- Recursos Disponíveis:
 - 500 contentores distribuídos em 7 distritos municipais.
 - Frota de 20 veículos, com capacidade total de 200 ton/dia.
 - 150 funcionários alocados para gestão de resíduos.
- Organização dos Distritos:
 - **KaMpfumo:** Alta geração de resíduos (300 ton/dia); foco em recolha porta-a-porta.
 - **Outros distritos:** Mistura de recolha porta-a-porta e pontos de recolha.
- Desafios Identificados:
 - Infra-estrutura limitada para reciclagem.
 - Falta de aterros sanitários adequados (ex.: aterro sanitário de Hulene).
 - Baixa sensibilização comunitária.
- Recomendações do Plano:
- Investir em tecnologias modernas (e.g., IoT).
- Ampliar programas de educação ambiental.
- Estabelecer parcerias com o sector privado para melhorar a logística.