



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

**COMPOSTAGEM INTELIGENTE: IMPLEMENTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO UTILIZANDO
RASPBERRY PI 3**

Jardel Seibel

Lajeado/RS, novembro de 2023



Jardel Seibel

**COMPOSTAGEM INTELIGENTE: IMPLEMENTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO UTILIZANDO
RASPBERRY PI 3**

Projeto de Monografia apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do curso de Engenharia de Controle e Automação, da Universidade do Vale do Taquari - Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientadora: Prof^a Aline Thaís Käfer

Lajeado/RS, novembro de 2023

Jardel Seibel

**COMPOSTAGEM INTELIGENTE: IMPLEMENTAÇÃO DE UM
SISTEMA DE CONTROLE E MONITORAMENTO UTILIZANDO
RASPBERRY PI 3**

A Banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada no componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso II, da Universidade do Vale do Taquari – Univates, como parte da exigência para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Prof. Ma. Aline Thaís Käfer - Orientadora
Universidade do Vale do Taquari

Prof. Me. Henrique Worm
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Prof. Dr. Juliano Schirmbeck
Universidade do Vale do Taquari – Univates

Lajeado/RS, 13 de dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus pais, Paulo Alberto Seibel e Ieda Maria Seibel, assim como à minha irmã Pâmela Maria Seibel, pelo apoio e incentivo constante ao longo de toda a minha trajetória acadêmica e profissional. É um imenso orgulho poder chamá-los de família, pois sem o apoio de vocês, nada disso teria sido possível.

Um agradecimento especial também à minha professora e orientadora, Aline Thais Kafer, pelo auxílio na escolha do tema, pelos incentivos, críticas construtivas e sugestões de melhoria que foram essenciais para a construção deste trabalho. Agradeço ainda pelo tempo dedicado nas revisões e encontros, contribuindo para o desenvolvimento deste projeto.

Por fim, desejo expressar meus agradecimentos a todos os professores, funcionários da instituição e demais colaboradores que, de alguma maneira, foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Muito obrigado!

RESUMO

O presente trabalho avaliou a aplicação de sensores e atuadores como sistema de supervisão e controle acessível, com o objetivo de monitorar o processo de compostagem orgânica, que teve por finalidade otimizar o processo e garantir a qualidade do composto orgânico. O sistema desenvolvido avaliou o processo em duas composteiras domésticas por um período de 10 dias, sendo uma equipada com o sistema e outra sem. As variáveis de temperatura, umidade e pH foram monitoradas por meio de sensores, coletadas por uma Raspberry Pi 3 e analisadas pela plataforma ThingsBoard. A composteira com o sistema integrado apresentou a vantagem de controle de temperatura (resistência elétrica) e aeração (*cooler*), que viabilizaram um ambiente ideal para o processo, acelerando a decomposição de matéria orgânica e diminuindo odores desagradáveis, além de apresentar um baixo consumo de energia. Por fim, o composto gerado no sistema integrado também apresentou qualidade superior com relação a avaliação visual e de pH, sugerindo uma qualidade elevada para fins de reutilização na forma de adubo orgânico. Em conclusão, a utilização de sensores e atuadores no sistema de compostagem comprovou eficiência na transformação de resíduos orgânicos, gerando húmus de qualidade com tempo reduzido e a um baixo custo.

Palavras-chave: compostagem; supervisão remota; automação; resíduos orgânicos.

ABSTRACT

The present study evaluated the application of sensors and effectors as an accessible supervision and control system, aiming to monitor and optimise the organic composting process while producing good quality organic compost. The developed system assessed the process in two domestic composters over a period of 10 days, one equipped with the system and the other without. Temperature, humidity, and pH variables were monitored through sensors, collected by a Raspberry Pi 3, and analyzed through the ThingsBoard platform. The composter with the integrated system demonstrated the advantage of temperature control (electric resistance) and aeration (cooler), creating an ideal environment for the process, accelerating the decomposition of organic matter, reducing unpleasant odors and showing low energy consumption. Lastly, the compost generated in the integrated system also exhibited superior quality on visual assessment and pH, suggesting a high-quality final product suitable for reuse as organic fertilizer. In conclusion, the use of sensors and effectors in the composting system proved efficient in transforming organic waste, generating good quality humus with reduced time and at a low cost.

Keywords: composting; remote monitoring; automation; organic waste.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM).....	15
Figura 2 - Os 17 objetivos da Agenda 2030.	16
Figura 3 - Disposição final de RSU no Brasil em 2021.....	20
Figura 4 - Indicador 6.1 da ODS 11 no Brasil em 2021.....	21
Figura 5 - Relação C/N durante a compostagem.	26
Figura 6 - Exemplo da evolução da temperatura em uma leira de compostagem.....	28
Figura 7 - Consumo de oxigênio em relação a umidade.	28
Figura 8 - Variação do pH durante o processo de compostagem em leiras.	30
Figura 9 - Exemplo de funcionamento do protocolo de comunicação MQTT.....	33
Figura 10 - Composteira automática Trasix Decomposer GG-02.....	35
Figura 11 - Composteira automática Trasix GG-300s.....	35
Figura 12 - Lomi, composteira eletrodoméstica.....	36
Figura 13 - Organograma completo do sistema proposto.	37
Figura 14 - Placa Raspberry Pi 3 Model B.	38
Figura 15 - Conexão da Raspberry Pi 3 com o conversor ADS1115.	39
Figura 16 - Configuração dos canais de saída do conversor ADS1115.	40
Figura 17 - Posicionamento dos sensores na composteira.	40
Figura 18 - Conexão dos sensores com a Raspberry Pi 3.	41
Figura 19 - Sensor de temperatura DS18B20.	41
Figura 20 - Função para obter-se a leitura do sensor DS18B20.	42
Figura 21 - Sensor de umidade do solo HD-38.	43

Figura 22 - Valores registrados pelo sensor de umidade do solo HD-38.	44
Figura 23 - Função para calcular os valores obtidos pelo sensor HD-38.	44
Figura 24 - Sensor de pH do solo PH-V5.	45
Figura 25 - Função para calcular os valores obtidos pelo sensor PH-V5.	45
Figura 26 - Curva de histerese em controlador de ação on/off.	46
Figura 27 - Módulo relé 5V de 8 canais.	46
Figura 28 - Resistência elétrica instalada na parte superior da estrutura.	47
Figura 29 - Fluxograma para controle de temperatura.	48
Figura 30 - Cooler e cano PVC instalados na base da estrutura.	49
Figura 31 - Fluxograma para controle de ventilação forçada.	49
Figura 32 - Conexão da Raspberry Pi ao ThingsBoard via protocolo MQTT.	50
Figura 33 - Token de acesso do dispositivo.	51
Figura 34 - Comando para envio dos dados de monitoramento ao ThingsBoard.	51
Figura 35 - Comando para envio dos dados de atuação ao ThingsBoard.	52
Figura 36 - Chave a ser atribuída no widget de monitoramento da temperatura.	53
Figura 37 - Alarmes criados na plataforma ThingsBoard.	53
Figura 38 - Organograma com os parâmetros e ações dos alarmes criados.	54
Figura 39 - Dashboard desenvolvido na plataforma ThingsBoard.	54
Figura 40 - Função para armazenamento dos dados de monitoramento.	55
Figura 41 - Lógicas para controle de temperatura e umidade.	56
Figura 42 - Estrutura interna do sistema proposto.	57
Figura 43 - Sistema implementado em uma composteira doméstica.	58
Figura 44 - Composteiras domésticas utilizadas para obtenção dos resultados.	59
Figura 45 - Painel na fase inicial do processo de compostagem.	61
Figura 46 - Variação da temperatura no primeiro dia de monitoramento.	62
Figura 47 - Variação da temperatura durante os 10 dias de monitoramento.	62
Figura 48 - Variação da umidade no primeiro dia de monitoramento.	63
Figura 49 - Variação da umidade durante os 10 dias de monitoramento.	64
Figura 50 - Variação do pH no primeiro dia de monitoramento.	64
Figura 51 - Variação do pH durante os 10 dias de monitoramento.	65
Figura 52 - Primeiro alarme emitido pelo sistema.	66
Figura 53 - Valores da umidade após ação condicionada pelo alarme.	66
Figura 54 - Segundo alarme emitido pelo sistema.	67
Figura 55 - Estabilização do índice de pH entre 7 e 8.	67

Figura 56 - Dados armazenados durante o período de monitoramento.	68
Figura 57 - Aspecto visual do primeiro dia na composteira com o sistema.	69
Figura 58 - Aspecto visual do primeiro dia na composteira sem o sistema.	69
Figura 59 - Aspecto visual do décimo dia na composteira com o sistema.	70
Figura 60 - Aspecto visual do décimo dia na composteira sem o sistema.	70
Figura 61 - Resultado do húmus com e sem o sistema integrado.	71
Figura 62 - Recipiente contendo a fração utilizada nos testes de pH.	72
Figura 63 - Resultados dos testes de pH em solução líquida.	73
Figura 64 - Tempo total de ativação da resistência.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Níveis de segurança QoS do MQTT.	34
Tabela 2 - Custos totais do sistema proposto.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
GPIO	<i>General Purpose Input Output</i> - Entradas e Saídas de Uso Geral
IOT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i> - Transporte Telemétrico de Mensagens em Filas
NBR	Norma Brasileira
ODM	Objetivos de Desenvolvimento do Milênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PNAD	Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RAM	<i>Random Access Memory</i> - Memória de Acesso Aleatório
ROM	<i>Read Only Memory</i> - Memória Somente de Leitura
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Tema.....	11
1.2 Delimitação do tema	11
1.3 Problema de pesquisa	12
1.4 Hipóteses	12
1.5 Objetivo geral	12
1.6 Objetivos específicos.....	12
1.7 Justificativa da pesquisa	13
1.8 Estrutura	13
2 REVISÃO TEÓRICA	14
2.1 Desenvolvimento sustentável.....	14
2.2 Cidades inteligentes e sustentáveis.....	16
2.3 Resíduos sólidos.....	18
2.3.1 Classificação dos resíduos sólidos.....	18
2.3.2 Geração de resíduos sólidos no Brasil	19
2.3.3 Coleta seletiva de resíduos	22
2.4 Resíduos orgânicos	23
2.4.1 Fertilizantes orgânicos	23
2.5 Compostagem	24
2.5.1 Métodos de compostagem	25
2.5.2 Fases de maturação	25
2.5.3 Relação Carbono/Nitrogênio	26
2.5.4 Temperatura.....	27
2.5.5 Umidade	28
2.5.6 Aeração	29
2.5.7 Potencial de Hidrogênio (pH)	29
2.6 Sistemas embarcados.....	30

2.6.1 Microcontroladores.....	31
2.6.2 Arquitetura ARM.....	31
2.7 Protocolo MQTT	32
2.8 Sistemas existentes para compostagem acelerada.....	34
3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	37
3.1 Processamento.....	38
3.2 Sensores	40
3.2.1 Sensor de temperatura DS18B20	41
3.2.2 Sensor de umidade do solo HD-38	43
3.2.3 Sensor de pH CWT-SOIL-PH-V5.....	44
3.3 Atuadores.....	46
3.3.1 Módulo relé	46
3.3.2 Resistência de aquecimento	47
3.3.3 Ventilação forçada	48
3.4 Interface <i>web</i>	50
3.5 Armazenamento de dados.....	55
3.6 Controle automatizado.....	55
3.7 Análise de custos do sistema implementado	56
3.8 Aquisição de dados	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.1 Fase inicial do processo.....	60
4.2 Resultados iniciais.....	61
4.2.1 Gráfico da temperatura	61
4.2.2 Gráfico da umidade.....	63
4.2.3 Gráfico do pH.....	64
4.2.4 Alarmes	65
4.2.5 Armazenamento dos dados obtidos.....	68
4.2.6 Aspectos visuais	68
4.3 Síntese dos resultados	71
5 CONCLUSÃO	75
REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Desde as primeiras conferências mundiais, visando discutir os problemas ambientais e o desenvolvimento sustentável, buscam-se formas de utilizar a tecnologia para minimizar as emissões de gases de efeito estufa no planeta. Em consequência disso, o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄) são os principais responsáveis por este fenômeno, causando o aumento da temperatura média do planeta Terra (OLIVEIRA, 2016).

Em 2010, foi instituída no Brasil a lei 12.305/2010, conhecida como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), trazendo avanços importantes para as políticas ambientais, como mudanças na regulamentação dos resíduos sólidos urbanos (RSU), estabelecendo a destinação correta dos resíduos e melhorias na gestão (FRATTA et al., 2019).

Pouco menos de 10 anos após a implantação da PNRS, o governo federal lançou no ano de 2019 o programa “Lixão Zero”, visando subsidiar estados e municípios, incentivando o aproveitamento energético dos resíduos, trazendo ações significativas para a disposição final ambientalmente adequada. Conforme dados do programa, a maior contribuição dos resíduos pertence à fração orgânica, cerca de 50%, o que reforça a importância da implantação de estratégias para seu reaproveitamento, como a produção de composto orgânico sólido e líquido para emprego como fertilizante (BRASIL, 2019; ZVEIBIL, 2015).

Conforme sugerido por Fernandes (1999), a compostagem se demonstra uma alternativa de destinação final dos resíduos orgânicos, evitando a destinação inadequada, que estão cada vez mais enfrentando restrições, por conta das emissões de gases. Nesse contexto, o CH₄ é o principal agente poluente quando os resíduos

são depositados em lixões e aterros, caracterizando-se como um processo anaeróbico.

De acordo com Kiehl (2004), o processo aeróbio é realizado por organismos que necessitam de oxigênio livre, sendo caracterizado pela alta temperatura desenvolvida no composto, ausência de maus odores, menor tempo de decomposição e pelas reações de oxidação e oxigenação durante o processo. Já o processo anaeróbico ocorre na ausência de oxigênio, apresentando significativas perdas de energia durante a decomposição da matéria orgânica e alto potencial de emissão de odores, fazendo com que a maioria dos sistemas de engenharia em compostagem sejam aeróbios (PRÁ et al., 2009).

No processo de compostagem estão presentes algumas variáveis que desempenham um papel importante em sua eficiência, como a temperatura, umidade e pH. Portanto, para que o composto apresente índices ideais de qualidade, sem degradar o meio ambiente, esses parâmetros devem ser monitorados e controlados (VALENTE et al., 2008).

Dessa forma, o controle e monitoramento dos parâmetros que influenciam no processo de compostagem, ou seja, na qualidade e no tempo em que o processo de decomposição da matéria orgânica é estabilizado e transformado em húmus, é uma forma automatizada de melhoria e eficiência para o processo.

Diante dos fatos mencionados, este trabalho apresenta um sistema de controle e monitoramento de baixo custo, aplicado a uma composteira, visando monitorar e controlar as variáveis durante o processo de compostagem.

1.1 Tema

Controle e monitoramento do processo de compostagem aeróbia para composteira utilizando Raspberry Pi 3.

1.2 Delimitação do tema

Instrumentação de uma composteira utilizando sensores adequados ao processo, com o objetivo de monitorar as variáveis mais relevantes, como temperatura, umidade e pH, possibilitando o controle preciso neste sistema.

1.3 Problema de pesquisa

Quais métodos e dispositivos de supervisão e controle de baixo custo podem contribuir para acelerar o processo de compostagem aeróbia e assegurar a obtenção da melhor qualidade do húmus?

1.4 Hipóteses

A utilização de dispositivos de aquecimento e aeração auxiliam no controle do processo de compostagem. Já o emprego de sensores, contribui para o monitoramento do processo. Dessa forma, a implementação de um sistema de supervisão e controle, utilizando dispositivos acessíveis, influencia diretamente na qualidade e aceleração do processo de maturação da compostagem aeróbia em uma composteira.

1.5 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de controle e monitoramento, por meio do uso de sensores e atuadores, como forma de tornar o processo de compostagem aeróbia mais rápido e eficiente em uma composteira.

1.6 Objetivos específicos

- Identificar as variáveis que influenciam no processo de compostagem aeróbia;
- Categorizar e sistematizar as variáveis envolvidas no processo;
- Seleção de sensores adequados para obter a medição precisa das variáveis identificadas na composteira;
- Coletar os dados dos sensores durante o processo de maturação da compostagem e enviá-los a uma placa Raspberry Pi 3, que fará o controle do processo;
- Elaborar uma interface *web* para monitorar e analisar os dados obtidos do processo.

1.7 Justificativa da pesquisa

Tendo em vista a preocupação mundial em minimizar o impacto humano para combater o aquecimento global, essa ideia surgiu a partir da necessidade de automatizar processos na área ambiental, visando diminuir a destinação da matéria orgânica em aterros e lixões. Como a utilização de sensores têm diversos tipos de aplicações, pensou-se na possibilidade de empregá-los para avaliar os parâmetros do processo de compostagem.

O monitoramento e controle desses parâmetros contribui para serem visualizados os eventos ocorridos durante todo o processo e a causa de todas as mudanças, possibilitando tomadas de decisões e correções de possíveis alterações durante a maturação, tornando-o mais efetivo e com índices ideais para o composto possuir a melhor qualidade.

1.8 Estrutura

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos principais.

O primeiro capítulo constitui-se de uma apresentação introdutória ao tema e as questões que o envolvem, juntamente com os problemas, hipóteses, objetivos e justificativas.

O segundo capítulo consiste no referencial teórico, apresentando um levantamento de informações que fundamentam as principais compreensões da compostagem aeróbia e o seu processo de maturação, incluindo também conceitos de sensoriamento e sistemas embarcados.

O terceiro capítulo detalha a metodologia utilizada na elaboração deste projeto, apresentando a tipologia de pesquisa e o desenvolvimento da proposta realizada.

Já o quarto capítulo apresenta os resultados obtidos ao longo do período de monitoramento do projeto.

Por fim, no quinto capítulo, são abordadas as considerações finais, além de sugestões de melhorias e direções para pesquisas futuras.

2 REVISÃO TEÓRICA

Com o propósito de realizar o desenvolvimento de um sistema de controle e monitoramento do processo de compostagem em uma composteira, é necessário compreender o funcionamento da compostagem acelerada e quais os principais fatores que influenciam em seu processo, incluindo o conhecimento de sensores e sistemas embarcados, que servirão de base para a automação e avaliação da maturação do composto.

Portanto, neste capítulo será apresentado um conjunto de temas relevantes que fundamentam o desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Desenvolvimento sustentável

Devido ao avanço das mudanças climáticas e a preocupação crescente com o aquecimento global, buscam-se cotidianamente meios sustentáveis para amenizar e desacelerar o agravamento desta crise ambiental. Minimizar hábitos consumistas, evitar desperdícios, descartar corretamente e evitar a geração de resíduos sólidos, são alguns dos mecanismos utilizados que contribuem para o desenvolvimento sustentável (SILVA, 2019).

O termo “desenvolvimento sustentável” foi introduzido mundialmente a partir da Eco-92, que foi uma conferência organizada pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1992 que visava discutir os problemas ambientais mundiais, e, para selar a indissociabilidade do desenvolvimento econômico em relação à conservação do meio ambiente, foi criada a Agenda 21. Para que o desenvolvimento seja sustentável, devem ser atendidos três principais segmentos: ser economicamente sustentado ou

eficiente, socialmente desejável e economicamente prudente ou equilibrado (ROMEIRO, 2012).

Segundo Silva (2022), após a Eco92, a ONU iniciou as tratativas no ano de 2000 para implementar os oito grandes objetivos globais, que ficou conhecido como os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM), conforme mostra a Figura 1. A finalidade destes objetivos era de promover o desenvolvimento global e tinha como principal destaque o combate à fome e a extrema pobreza mundial, sendo a agenda vigente de 2000 até 2015.

Figura 1 - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM).



Fonte: Brasil (2015).

Em 2015 foi criada a Agenda 2030, em conjunto com os 193 estados membros da ONU, com o propósito de erradicar a pobreza, proteger o meio ambiente e as condições climáticas, além de garantir a paz e a prosperidade mundial. A agenda possui 17 objetivos que abordam os principais desafios de desenvolvimento enfrentados por pessoas no Brasil e no mundo (ONU, 2015).

A Figura 2 apresenta os 17 objetivos a serem alcançados até 2030, onde se destacam as ODS 6, 11, 12, e 13, que estão ligadas à gestão de resíduos e compostagem.

Figura 2 - Os 17 objetivos da Agenda 2030.



Fonte: ONU (2015).

2.2 Cidades inteligentes e sustentáveis

“Cidades inteligentes” é um termo que tem como principal objetivo promover melhorias aos recursos públicos, aumentando a qualidade dos serviços oferecidos aos cidadãos, reduzindo assim os custos operacionais da administração pública. Essas melhorias estão diretamente associadas à utilização da infraestrutura de comunicação, também chamadas de TICs (Tecnologias da Informação e da Comunicação), para melhorar a eficiência econômica e política, permitindo o desenvolvimento social e urbano, aumentando assim a transparência e a qualidade de vida aos cidadãos (ZANELLA et al., 2014).

As TICs podem ter diversas aplicações que viabilizam maior eficiência no uso dos recursos materiais, técnicos e humanos, podendo implementar também novos canais de comunicação, melhorando a eficiência e transparência com as informações, contribuindo para que se tomem as melhores decisões (WEISS; BERNARDES; CONSONI, 2015). Visando auxiliar no desenvolvimento das cidades inteligentes, Lazaretti et al. (2019) afirma que a IoT (Internet das Coisas) é uma das diversas ferramentas que podem contribuir com esse avanço.

A IoT é um conceito que utiliza tecnologias de computação, redes sem fio, protocolos de comunicação, sensores e dispositivos com tecnologias incorporadas

para interconectar e transmitir informações sobre os vários sistemas dentro das cidades (JOÃO; SOUZA; SERRALVO, 2018). Contribuindo com o autor, Zanella et al. (2014) afirma que as IoTs urbanas visam explorar as mais avançadas tecnologias para contribuir com a administração das cidades e para os cidadãos.

As cidades são sistemas interconectados e compostos por muitos indivíduos, meios de transporte, empresas, comunicações, serviços, entre outras utilidades. Deste modo, com o crescimento populacional e da urbanização, tendem a crescer também os problemas sociais, econômicos e organizacionais que podem impactar e comprometer a sustentabilidade ambiental das cidades (NEIROTTI et al., 2014).

A constante preocupação com o meio ambiente e as formas de como tornar uma cidade mais sustentável mostram que, conforme Loureiro (2013), as cidades estão cada vez mais sendo vistas de forma ampla, inserindo as necessidades da população nesse contexto e idealizando um novo conceito de desenvolvimento urbano sustentável.

Cidades sustentáveis foi um conceito adotado a partir da criação da Eco-92 e depois intensificado na ODS 11 da Agenda 2030, cujo objetivo é tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis. Com isso, também deve ser prevista uma série de diretrizes que visam melhorar a gestão da área urbana e prepará-la para as gerações futuras (PEREIRA; SIMPLÍCIO; DONADI, 2019).

Os autores acima também afirmam que as cidades sustentáveis devem estar, em sua construção, prontas para enfrentar desafios e imprevistos que impactam no âmbito urbano, como as mudanças climáticas e, conseqüentemente, catástrofes ambientais. Devem levar em conta também todos os níveis sociais e prestar assistência às pessoas mais vulneráveis, como mulheres, crianças, pessoas com deficiências e idosos.

Além disso, devem ser monitorados, por meio de ferramentas geográficas, todos os processos executados para a construção das cidades sustentáveis, inserindo indicadores que se adaptem à realidade nacional, para que assim, possam fazer comparações em diferentes escalas. Esses resultados e informações servem de norteamento para representar o território nacional e a realidade de cada estado e seus municípios, a fim de cumprir as metas instituídas pela ONU.

Como enfatiza Vieira (2012), para que uma cidade adote práticas sustentáveis, precisam ser analisados diversos indicadores econômicos, determinando se é viável

ou não a implementação e devem ser realizadas por todos os setores de forma eficiente. O autor também ressalta que o direito à cidade sustentável urbana está inserido no ordenamento jurídico brasileiro e é uma garantia individual que assegura diversos direitos aos cidadãos, como moradia, transportes, saneamento básico, infraestrutura, onde o poder público e a sociedade civil estabelecem as estratégias efetivas de implementação das políticas e práticas sustentáveis.

Corroborando com o autor acima, Loureiro (2013) destaca que a incessante evolução das cidades motivou o governo a criar legislações jurídicas, com o intuito de estruturar melhor as cidades, a fim de proteger o meio ambiente e tornar um âmbito mais salubre à população que vive nas cidades, além de estimular com programas educacionais os cuidados com a geração de resíduos sólidos.

2.3 Resíduos sólidos

De acordo com a norma brasileira ABNT 10.004, os resíduos sólidos podem ser definidos como:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

Os resíduos sólidos são materiais heterogêneos, ou seja, inertes, minerais e orgânicos, que se formam através do resultado das atividades humanas e da natureza e são constituídos de diversas substâncias degradáveis e não degradáveis. Podem ocasionar diversos problemas sanitários, econômicos e estéticos, quando não receberem os cuidados convenientes (LIMA, 2001).

2.3.1 Classificação dos resíduos sólidos

Os resíduos sólidos podem ser classificados conforme o processo ou atividade que lhes deu origem, suas características e seus impactos à saúde e ao meio ambiente (ABNT, 2004).

A norma brasileira ABNT 10.004 divide os resíduos sólidos em 4 classes, que são:

- Resíduos classe I – Perigosos: são aqueles que apresentam periculosidade ou características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade;
- Resíduos classe II – Não perigosos: são subdivididos entre a classe A e B abaixo:
- Resíduos classe II A – Não inertes: podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água e não se enquadraram nos resíduos de classe I;
- Resíduos classe II B – Inertes: aqueles que, ao se submeterem a um contato dinâmico ou estático com a água destilada ou deionizada à temperatura ambiente, conforme especificado na ABNT 10.004, não apresentem solubilidade superior aos padrões de potabilidade da água, exceto aspectos como, cor, turbidez, dureza e sabor (ABNT, 2004).

Segundo Bozzano (2019), a compostagem está associada à classe II A, apresentando diversos benefícios à natureza, como a destinação útil de resíduos, evitando o acúmulo de resíduos em aterros e gerando um material apto para melhorar as características do solo.

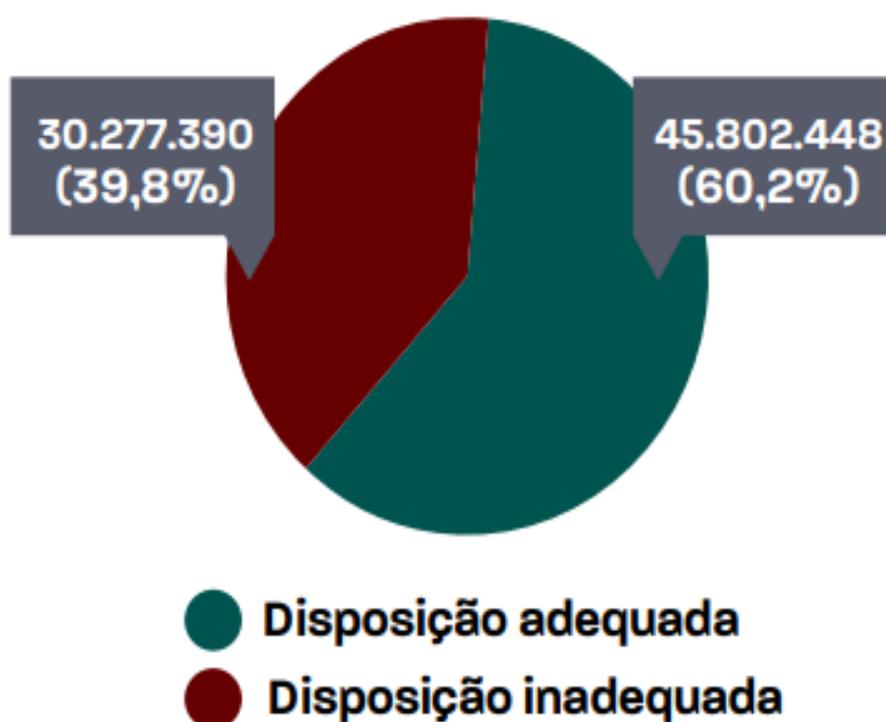
2.3.2 Geração de resíduos sólidos no Brasil

Conforme dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) (IBGE, 2015), pouco mais de 84% da população brasileira vive em áreas urbanas, apresentando assim, um alto índice de concentração de geração de resíduos sólidos nesses locais, acarretando sérios problemas ambientais e à saúde se não houver a destinação correta. De acordo com Cortez e Francelin (2014), os resíduos urbanos coletados no Brasil detêm um elevado percentual de matéria orgânica e que, caso não sejam descartados e coletados separadamente, acabam não sendo destinados ao tratamento apropriado, como a compostagem.

Em 2021, o Brasil atingiu a marca de 82,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) gerados, o que equivale a mais de 225 mil toneladas diárias, ou seja, média de 1,07 kg por habitante diariamente. Cerca de 60,2% da coleta dos

RSU gerados, o equivalente a 45,8 milhões de toneladas, ainda continua sendo encaminhada para aterros sanitários. Em contrapartida, 39,8% de RSU são destinados para áreas de disposição inadequada, como lixões e aterros controlados, que seguem operando em todas as regiões do país, conforme mostra a Figura 3. (ABRELPE, 2021).

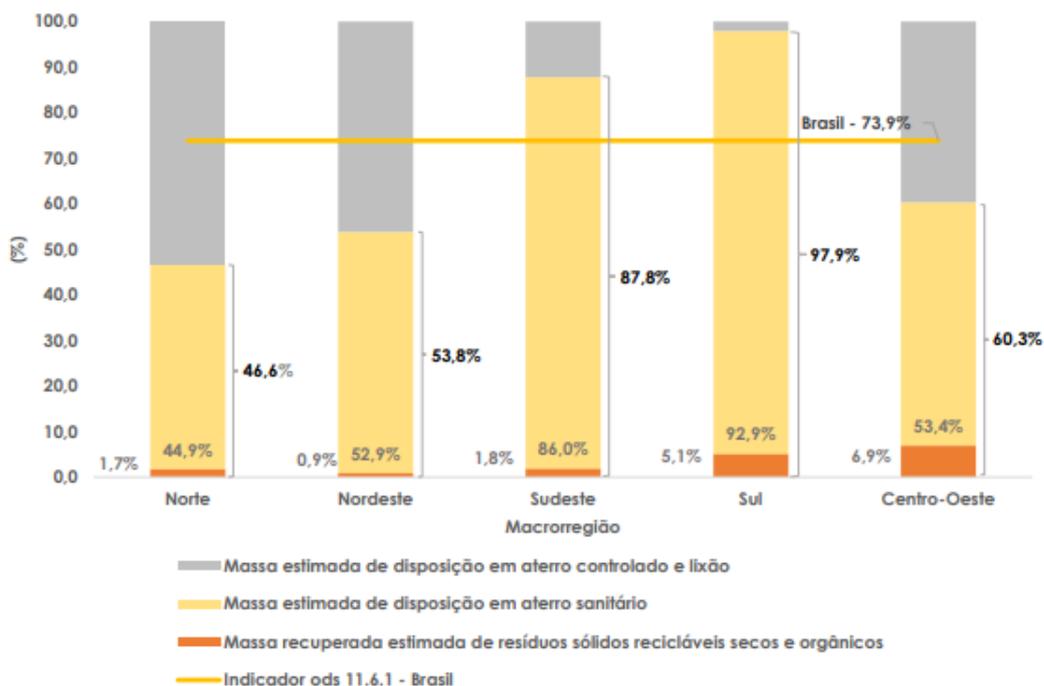
Figura 3 - Disposição final de RSU no Brasil em 2021.



Fonte: ABRELPE (2021).

De acordo com o SNIS (2021), o manejo de RSU está atrelado a ODS 11 e 12 da Agenda 2030, onde há o indicador 6.1 da ODS 11, que tem por objetivo expor a proporção de resíduos sólidos com destinação e disposição final adequada em relação ao total estimado de resíduos sólidos coletados no País, representado na Figura 4 a seguir.

Figura 4 - Indicador 6.1 da ODS 11 no Brasil em 2021.



Fonte: SNIS (2021).

Com a crescente geração de resíduos sólidos nas cidades e a falta de estrutura para sua destinação, fizeram-se necessárias mudanças na forma de tratamento e conscientização com o meio ambiente. Assim, foi instaurada em 2010 a Lei da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) nº 12.305/2010, que alterou a Lei 9.605/1998, trazendo diversas diretrizes de gestão integrada que visam buscar soluções para os resíduos sólidos, contribuindo para o desenvolvimento sustentável. O artigo 3º da Lei também evidencia a preocupação com o gerenciamento de resíduos sólidos, envolvendo etapas de coleta, como transporte, tratamento, destinação e disposição final (REIS; FRIEDE; LOPES, 2017).

Art. 3º VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010, texto digital).

Corroborando com os autores acima, Cortez e Francelin (2014), enfatizam que a Lei responsabiliza os gestores públicos e geradores pela adequada gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, obrigando os gestores municipais a extinguir os lixões e instaurar aterros sanitários, ou regularizar caso já tenham. Essa medida só

terá o devido efeito caso a população também ajude a adotar iniciativas conjuntas, como a separação adequada, coleta seletiva e reaproveitamento dos resíduos orgânicos para compostagem, tudo isso por meio de ações educacionais, tornando as cidades mais sustentáveis.

2.3.3 Coleta seletiva de resíduos

A coleta seletiva dos resíduos é uma das atividades que contribuem para a sustentabilidade e conforme (Besen et al., 2014), é um serviço público implantado pela Constituição Federal aos municípios. Essa atividade faz parte da gestão de resíduos sólidos urbanos: “Art. 18º §1º II – implantar a coleta seletiva com a participação de cooperativas ou outras formas de associação de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis formadas por pessoas físicas de baixa renda” (BRASIL, 2010).

Com isso, a reciclagem, que é uma prática ligada ao setor industrial, complementa essa atividade e possibilita a sustentabilidade urbana, promovendo a economia dos recursos naturais e insumos, como a água e energia, reduzindo a disposição final dos resíduos sólidos no solo, evitando assim, a emissão de gases do efeito estufa.

Besen et al. (2014) também conceituam que a gestão integrada e sustentável de resíduos requer uma estrutura de objetivos como: minimização da geração e redução dos impactos negativos de resíduos; maximização de reutilização da reciclagem e compostagem; recuperação energética; efetivação de tratamento e disposição final dos resíduos de forma segura; maximização da cobertura de serviços de coleta e limpeza urbana.

Conforme a Lei nº 12.305/2010, a responsabilidade da limpeza urbana e do manejo dos resíduos sólidos, no âmbito do ciclo de vida dos produtos, é compartilhada com fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, consumidores e serviços públicos, sendo sempre observado se houver plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos. Portanto, cabe ao titular dos serviços públicos: “Art. 36º V - implantar sistema de compostagem para resíduos sólidos orgânicos e articular com os agentes econômicos e sociais formas de utilização do composto produzido” (BRASIL, 2010).

2.4 Resíduos orgânicos

Os resíduos orgânicos são constituídos basicamente por restos de alimentos e vegetais descartados por atividades humanas, podendo ter origem domiciliar, urbana, agrícola, industrial e de saneamento básico (BRASIL, 2019). Para Kiehl (2004), os resíduos orgânicos são excelentes fontes de matéria-prima que podem ser transformados em fertilizante orgânico humificado.

De acordo com Zago e Barros (2018), a PNRS não reconheceu, de maneira digna, os resíduos orgânicos em suas normativas, porém, enfatiza que as frações orgânicas, bem como resíduos plásticos, metais, papéis e vidros, devem ser destinados por meio de tecnologias como compostagem e aproveitamento energético (ZAGO; BARROS, 2018).

Os mesmos autores mencionam também que a falta de comprometimento com os descartes dos resíduos orgânicos pode ocasionar graves problemas ambientais, como a degradação do solo, erosão e mudanças climáticas. Além disso, como reforça Kiehl (2004), os resíduos orgânicos são geralmente utilizados na agricultura como fertilizante orgânico, o que contribui para o desenvolvimento do solo, pois possuem fontes de nutrientes, como fósforo, nitrogênio e potássio.

2.4.1 Fertilizantes orgânicos

Com o objetivo de elevar os níveis de produtividade dos solos, que geralmente são carentes de nutrientes essenciais, devem ser utilizados adequadamente fertilizantes químicos ou orgânicos na agricultura para esta finalidade (MARRIEL et al., 1987). Conforme Brietzke (2016), diversos tipos de fertilizantes destinam-se a melhorar as condições do solo, como os minerais, orgânicos e organominerais. Com isso, Kiehl (2004) afirma que os resíduos orgânicos que percorrem o processo de compostagem, onde sofrem decomposição microbiana, podem ser utilizados como fertilizantes orgânicos, também chamados de composto.

Os dejetos orgânicos de origem animal possuem altos índices de nitrogênio, potássio e fósforo em sua composição, onde o aumento da concentração de compostos nitrogenados, nas águas superficiais e subterrâneas, traz riscos ambientais elevados. Já o fósforo e o potássio, quando aplicados em excesso no solo, podem causar poluição através do processo de erosão. A concentração de nitrogênio

nos resíduos orgânicos de origem vegetal é duas a quatro vezes maior que a proporção de potássio e fósforo em sua composição (PRÁ et al., 2009; KIEHL, 2004).

De acordo com a Instrução Normativa nº 61 do MAPA (Brasil, 2020), os fertilizantes orgânicos simples, mistos, compostos e organominerais são classificados conforme as matérias-primas e dispostos, em sua produção, como:

I - Classe “A”: produto que utiliza matéria-prima gerada por atividades agrícolas, industriais, agroindustriais e comerciais. Inclui-se as de origem mineral, vegetal, animal, lodo industrial e agroindústrias que possuem sistema de tratamento de águas residuárias, resíduos vegetais e alimentos gerados em pré e pós consumo, separados na fonte geradora e recolhidos por coleta diferenciada, isentos de despejos ou contaminantes, que resultam em um produto de utilização segura para a agricultura.

II - Classe “B”: produto que utiliza qualquer quantidade de matéria-prima orgânica oriunda das atividades urbanas, industriais e agroindustriais. Inclui-se frações orgânicas de resíduos sólidos, lodos gerados nas estações de tratamento de esgotos, em indústrias e agroindústrias que possuem sistemas de tratamento de águas residuárias, contendo qualquer quantidade de despejos ou contaminantes sanitários, que resultam em um produto de utilização segura para a agricultura.

2.5 Compostagem

A Instrução Normativa nº 61 do MAPA (Brasil, 2020) define o termo compostagem como:

Art. 2º V - compostagem: processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias e termofílicas, resultando em material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem (BRASIL, 2020, texto digital).

O processo controlado se deve ao fato de poder acompanhar e controlar as variáveis que estão presentes nesta técnica, como a temperatura, aeração, umidade, pH, relação C/N, entre outros. Esses fatores influenciam diretamente na eficiência do processo de compostagem, onde os parâmetros devem estar em uma combinação ótima para que se obtenha um composto final estável, sanitizado e sem oferecer riscos ambientais (KIEHL, 2004; VALENTE et al., 2008).

A compostagem pode ser definida também como um método de decomposição de materiais biodegradáveis existentes nos resíduos, que, além de diminuir o volume e concentrar os nutrientes, proporciona um material adequado para a fertilização dos solos (PRÁ et al., 2009).

2.5.1 Métodos de compostagem

Conforme Kiehl (2004), existem dois principais métodos de compostagem que auxiliam no tratamento de resíduos orgânicos sólidos, tendo por finalidade a obtenção da matéria orgânica bioestabilizada e humificada, que são: compostagem natural e compostagem acelerada.

A compostagem natural ocorre de forma mais lenta, onde leiras de compostagem ficam em pátios abertos, geralmente superando 100 dias para que o composto fique concluído. Já a compostagem acelerada é um processo mais rápido, pois são oferecidas condições, como adição de enzimas, aeração e técnicas de misturas mecanizadas, a fim de diminuir o resultado do composto para 40 dias ou até menos (PIRES, 2011).

As empresas prestadoras de serviços utilizam métodos que vão desde compostagem natural e vermicompostagem às tecnologias mais modernas, como biodigestores e composteiras elétricas (SIQUEIRA; ASSAD, 2015).

2.5.2 Fases de maturação

A compostagem aeróbia passa por três fases de maturação, sendo elas: a fase de decomposição, de bioestabilização e a de humificação (NOGUERA, 2011). Conforme afirma Kiehl (2004), a fase inicial de decomposição, também chamada de fitotóxica, é caracterizada pelo composto ainda estar imaturo, onde a matéria orgânica não se desenvolve com rapidez e esse período pode durar de 15 a 20 dias.

A fase de bioestabilização caracteriza-se pela significativa atividade de bactérias e fungos atuantes na matéria orgânica, ocasionando desprendimento de água e gases como CO e CO₂ e, com isso, o composto também pode alcançar altas temperaturas naturalmente (NOGUERA, 2011; OLIVEIRA, 2022). Nesta fase, o composto já pode ser comercializado e empregado como fertilizante orgânico, caso o

índice de pH for superior a 6,0 e a relação de entre Carbono e Nitrogênio (C/N) próximo a 18/1 (KIEHL, 2004).

A última fase, conhecida como humificação ou maturação, é determinada pela aparição de protozoários, vermes e insetos, onde a coloração do composto torna-se mais escura e o cheiro é similar ao de terra mofada. Dessa forma, o composto perde todas suas características iniciais, devido à completa decomposição da matéria orgânica (KIEHL, 2004; NOGUERA, 2011).

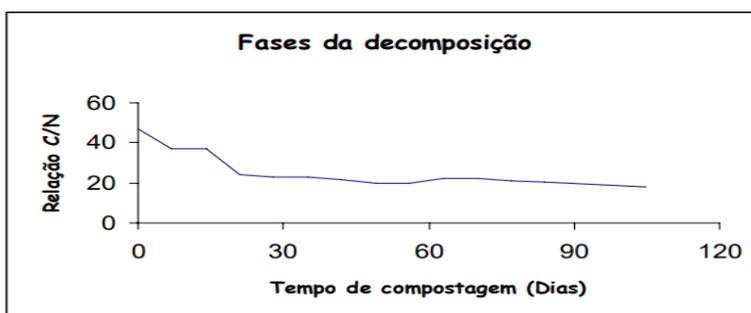
2.5.3 Relação Carbono/Nitrogênio

Com o intuito de avaliar os níveis de maturação dos resíduos orgânicos e seus efeitos no crescimento microbiológico, utiliza-se a relação de carbono/nitrogênio (C/N), onde a atividade dos microrganismos heterotróficos presentes depende do carbono para fonte de energia e o nitrogênio para síntese de proteínas (PRÁ et al., 2009).

De acordo com Silva et al. (2008), a relação de C/N considerada ótima para que o substrato tenha uma alta eficiência, deve ser em torno de 30:1, pois os microrganismos atuantes nos resíduos orgânicos absorvem sempre 30 partes de carbono (C) para uma parte de nitrogênio (N).

A fase inicial de decomposição dos resíduos orgânicos apresenta elevadas relações de C/N, conforme mostra a Figura 5, em função da baixa atividade microbiana. Conforme a oxidação microbiana se inicia, a relação entre C/N varia entre 30/1 e 17/1, indicando a fase de bioestabilização. No entanto, quando a relação chega a 17/1, a matéria orgânica já está estabilizada e o composto já pode ser aplicado ao solo (MOURALES, 2006).

Figura 5 - Relação C/N durante a compostagem.



Fonte: Mourales et al. (2006).

Quando o composto é preparado em leiras de maneira artesanal e utilizando diferentes materiais, fica facilitada a condição de melhorar a relação C/N. Já quando se trabalha com lixo domiciliar, a possibilidade de melhorar essa relação fica dificultada, pois não há diversidade de fontes de carbono disponíveis, como folhas secas e serragem (KIEHL, 2004).

2.5.4 Temperatura

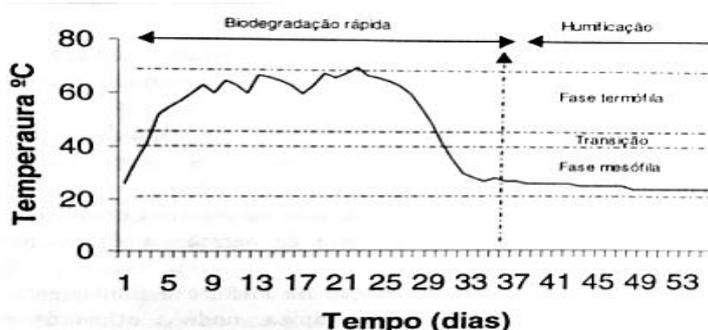
A gradativa elevação da temperatura pode ser o primeiro indicativo de que a compostagem se iniciou, pois, sua elevação caracteriza-se pelo crescimento de microrganismos mesófilos. Ao longo do processo de biodegradação, a população de mesófilos diminui, proliferando os microrganismos termófilos, que provocam uma degradação mais rápida e um aumento de temperatura mais significativo, tendo como resultado a eliminação de microrganismos patogênicos (FERNANDES, 1999; KIEHL, 2004).

Na fase termofílica, o calor gerado é necessário para concentrar os nutrientes, podendo atingir valores de temperatura superiores a 60 °C, possuindo um menor potencial de geração e liberação de maus odores. Já na fase de humificação, as temperaturas ficam, em média, na faixa dos 30 °C (PRÁ et al., 2009).

Segundo Kiehl (2004), a compostagem aeróbia necessita de temperaturas elevadas para estimular a atividade microbiana. Dessa forma, o aumento da temperatura durante o processo de compostagem, que é consequência da ocorrência de transformações químicas nos microrganismos presentes no processo, pode ser considerado, desde que controlado, um parâmetro de eficiência durante a degradação do composto (HECK et al., 2013).

Conforme Fernandes (1999), a aeração pode também ser usada para controlar a temperatura, pois se o ar comprimido insuflado no composto for muito maior que a respiração microbiana, ele terá a função de dissipador, liberando o calor do processo. A Figura 6 ilustra a evolução da temperatura em relação ao tempo (em dias), em uma leira de compostagem.

Figura 6 - Exemplo da evolução da temperatura em uma leira de compostagem.



Fonte: Fernandes (1999).

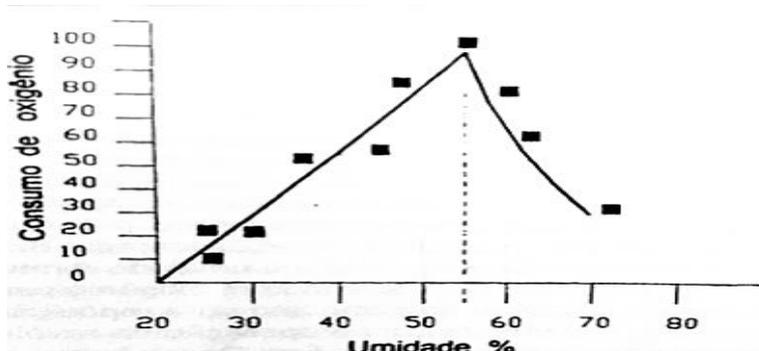
2.5.5 Umidade

A influência da água no processo de compostagem é imprescindível, pois as necessidades fisiológicas da vida microbiana dependem dela. Por isso, a umidade recomendada para o processo é entre 40 a 60% (NOGUERA, 2011).

Corroborando com o autor acima, Fernandes (1999) afirma que quando os resíduos orgânicos estiverem com valores abaixo de 40%, o processo será mais lento, pelo fato de a decomposição ser aeróbia, onde a ação dos fungos será predominante. Já quando a umidade estiver acima de 60%, o material estará molhado e a água irá ocupar os espaços vazios do material, impedindo a passagem de oxigênio, sendo a decomposição anaeróbia.

O consumo de oxigênio é mais elevado no início do processo de compostagem, entre 25 até 55%, caindo praticamente de forma vertical quando ultrapassa esse último valor (KIEHL, 2004). A Figura 7 mostra o efeito da umidade no consumo de oxigênio no processo de compostagem do lixo domiciliar.

Figura 7 - Consumo de oxigênio em relação a umidade.



Fonte: Kiehl, 2004.

2.5.6 Aeração

A compostagem aeróbia necessita da presença de oxigênio para decompor os substratos orgânicos. Portanto, a aeração é essencial para a geração de calor ao metabolismo dos microrganismos e para a liberação do CO₂ produzido (PRÁ et al., 2009).

Segundo Fernandes (1999), a circulação de ar é fundamental na fase inicial da compostagem, quando a atividade microbiana é mais intensa, pois auxilia a tornar o processo mais ágil e eficiente, evitando maus odores e a presença de insetos.

Conforme Pires (2011), durante a compostagem, há uma direta relação entre a temperatura e o consumo de oxigênio, onde a aeração auxilia a evitar os altos índices de temperaturas, que por sua vez, também depende da umidade e da intensidade dos revolvimentos ou movimentações do substrato para ter a eficiência necessária.

Nas usinas de compostagem acelerada a aeração é realizada através da movimentação do lixo, onde os digestores possuem mecanismos automatizados, e podem ou não ser acompanhados de uma ventilação forçada (KIEHL, 2004).

2.5.7 Potencial de Hidrogênio (pH)

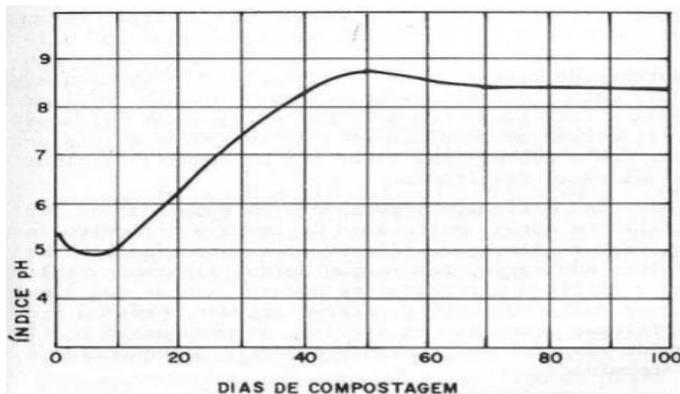
A matéria orgânica geralmente apresenta um nível de acidez alto, ou seja, índice de pH baixo, geralmente entre 5 e 6, fazendo com que o substrato tenha inicialmente uma reação ácida devido à produção de ácidos orgânicos, sendo caracterizado pela fase mesófila (FERNANDES, 1999).

De acordo com Kiehl (2004), conforme o processo de compostagem vai se desenvolvendo, o pH vai se elevando, justamente porque os ácidos orgânicos começam a reagir com as bases liberadas da matéria orgânica, passando de 7 (neutro) e alcançando pH superior a 8 (básico).

Esse processo é um indicativo da passagem pela fase termófila, onde ocorre a hidrólise das proteínas e liberação de amônia, onde atingem na etapa final do processo um pH levemente alcalino e a matéria orgânica húmica, quando completamente oxidados (FERNANDES, 1999; PEDROSA et al., 2013).

Conforme Prá et al. (2009), o valor do pH é um indicativo de que a biomassa está estabilizada, ou seja, sua medição ajuda a identificar em que etapa está o processo de compostagem, conforme pode ser visualizado na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Variação do pH durante o processo de compostagem em leiras.



Fonte: Kiehl (2004).

Visto que a compostagem é um processo de decomposição biológica controlada, se faz necessário o uso de circuitos integrados para armazenamento de dados, a fim de interpretá-los e enviar para algum display, para auxiliar na visualização do monitoramento das variáveis do processo. Em virtude disso, a seção a seguir apresenta os sistemas embarcados, que auxiliam no controle de processos, recebendo sinais de entradas, proveniente do usuário ou de sensores, e enviando sinais de controle para atuadores, com a finalidade de controlar um ambiente ou dispositivo físico (OSSADA, 2010).

2.6 Sistemas embarcados

Os sistemas embarcados, ou sistemas microprocessados, são constituídos por um conjunto de pequenos hardwares capazes de realizar diversas tarefas, não dependendo de um processamento maior. Porém, necessitam de circuitos externos para funcionar, como a memória e outros componentes para o envio e o recebimento de dados (ZILLER, 2000). Na parte interna dos microprocessadores encontram-se milhares de transistores com funções lógicas, capazes de executar operações aritméticas e de controle (TOCCI; BARSALI, 1990).

De acordo com Back (2018), os sistemas embarcados são aplicados em processos que utilizam ações diretas do usuário, como pressionar um botão, tocar a tela e para aquisição de dados de sensores. O componente eletrônico principal de um sistema embarcado é o microcontrolador, sendo responsável por monitorar o ambiente ou equipamento que está sendo controlado (OSSADA, 2010).

2.6.1 Microcontroladores

Os componentes eletrônicos, como sensores, atuadores e controladores estão presentes em sistemas mecânicos há muito tempo. O desenvolvimento dos circuitos integrados de tamanho reduzido possibilitou uma produção em larga escala e de baixo custo para a criação de microprocessadores dedicados, também chamados de microcontroladores (ADAMOSKI; FURUKAWA; COZMAN, 2001).

Conforme Souza (2005), os microcontroladores, diferentemente dos microprocessadores, possuem todos os periféricos necessários para seu funcionamento, ou seja, memória RAM e ROM, contadores, conversores digitais e analógicos, portas de acionamentos, controlador serial, tudo isso em um circuito integrado encapsulado numa pastilha de silício.

Os microcontroladores são utilizados para controlar processos e dispositivos, tendo um custo bem menor em comparação aos microprocessadores justamente por apresentar maior lentidão e possuírem menor espaço de endereçamento. Executam tarefas que necessitam de muitos outros componentes eletrônicos. Sendo assim, aprender a programar microcontroladores significa aprender a resumir circuitos elétricos, muitas vezes de um tamanho considerável, em apenas um único componente (MARTINS, 2005).

Para alocar as tarefas que serão controladas pelo microcontrolador, é necessário gravar um programa em sua memória de código interna. Para isso, a sintaxe de códigos é desenvolvida em uma interface de programação e transformada por um software, chamado de compilador em uma linguagem binária, sendo também conhecida como linguagem de máquina (PEREIRA, 2005).

A linguagem C é muito utilizada para programação e é encontrada em seus compiladores para a criação de softwares. O compilador toma a frente das tarefas de controle e encontro das variáveis, algoritmos matemáticos e lógicos, checagem de bancos de dados e memória (PEREIRA, 2005).

2.6.2 Arquitetura ARM

Conforme Moura (2015), a arquitetura ARM é uma categoria de processadores RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) superescalares amplamente utilizada em

dispositivos portáteis e embarcados, como celulares, tablets e impressoras, destacando-se pelo seu baixo consumo de energia.

A arquitetura ARM utiliza a instrução *load-store*, na qual a instrução do tipo *load* tem a finalidade de transferir dados da memória para os registros internos do processador e o tipo *store* realiza a cópia de dados dos registros internos para a memória. Assim, todo o processamento ocorre internamente no processador, pois não há nenhuma instrução que permita a manipulação direta dos dados na memória (SAMPAIO, 2011).

De acordo com Andrade (2016), a Raspberry Pi utiliza a arquitetura ARM em sua placa e não se limita a um microcontrolador, podendo ser considerada um sistema embarcado semelhante a um computador, porém, possui um porte menos robusto, com um custo e desempenho bem menor.

Com esse hardware, é possível realizar diversas tarefas de aplicabilidade a níveis industriais, que envolvem automação, podendo ser utilizadas as linguagens de programação Python, C/C++, Java ou Assembly. Essa placa apresenta um conjunto de GPIO (*General Purpose Input Output*), permitindo coordenar uma série de componentes eletrônicos, botões e sensores (ANDRADE, 2016; HEINEN, 2015).

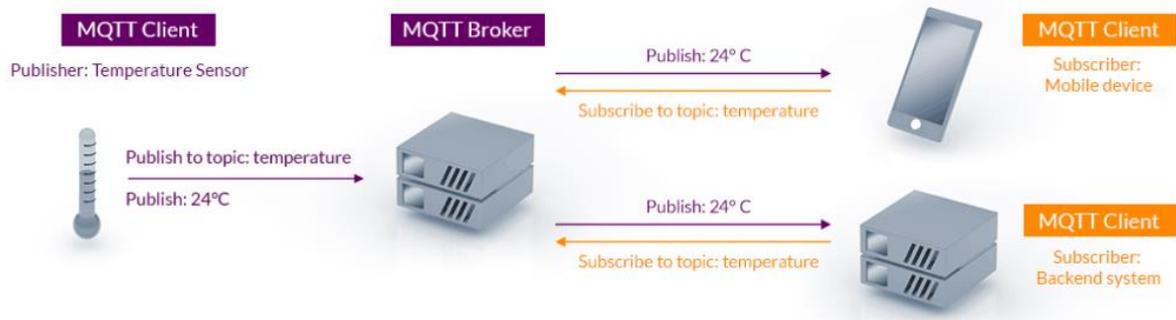
2.7 Protocolo MQTT

O protocolo *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT) é muito utilizado no desenvolvimento de aplicações voltadas para a indústria 4.0, principalmente na coleta de dados provenientes de máquinas e equipamentos do âmbito industrial, possibilitando a integração de tais dados instantaneamente ao usuário, permitindo melhor visualização dos processos e tomadas de decisões necessárias (SOUSA et al., 2021).

Conforme Conceição e Costa (2018), o protocolo MQTT segue o modelo *publish-subscribers* (publicação-assinatura). Nesse arranjo, ilustrado na Figura 9, o dispositivo assume a responsabilidade de encaminhar (*publish*) informações para o servidor, que atua como intermediário (*broker*). O *broker*, ciente dos clientes interessados nas informações transmitidas (*subscribers*), encarrega-se de retransmitir as informações assim recebidas.

Figura 9 - Exemplo de funcionamento do protocolo de comunicação MQTT.

MQTT Publish / Subscribe Architecture



Fonte: MQTT.org (2023).

O protocolo MQTT se destaca por ser leve e eficiente na transferência de dados sob forma de matrizes de bytes. Sua flexibilidade permite diferentes aplicações em uma variedade de dispositivos e serviços de IoT (BIOT, 2020).

Além dos termos já mencionados (*publish*, *subscriber* e *broker*), é válido destacar os seguintes elementos essenciais que conferem funcionalidade ao protocolo:

- **Topic (Tópico)** – Endereço para onde os dados das mensagens serão encaminhados.
- **Client (Cliente)** – Será o componente com a capacidade de comunicar-se com o intermediário (*broker*), permitindo o envio e recebimento de dados.
- **Mensagem** – Será o conjunto de informações compartilhadas entre os clientes e o intermediário (*broker*).
- **Unsubscribe (Cancelar inscrição)** – Possibilita cancelar a subscrição de um tópico específico.
- **Payload (Conteúdo útil)** – Será o conteúdo da mensagem a ser transmitida.

Segundo Martins (2019), o protocolo MQTT inclui três níveis de Quality of Service (QoS), os quais desempenham a função de gerenciar a qualidade do tráfego de dados na rede. A escolha desses níveis é baseada na exigência específica de cada aplicação, proporcionando distintos graus de segurança, sendo detalhados na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Níveis de segurança QoS do MQTT.

Quality of Service (QoS)	Retransmissão	Confirmação e recebimento	Múltiplas entregas
0	Não	Não	Não
1	Sim	Sim	Sim
2	Sim	Sim	Não

Fonte: Adaptado de Martins (2019).

2.8 Sistemas existentes para compostagem acelerada

Para analisar hardwares e softwares que já utilizam técnicas de controle e monitoramento, por meio de sistemas que utilizam sensores e atuadores, foram investigados trabalhos e tecnologias já existentes no mercado. Segundo Fernandes (1999), os sistemas mais conhecidos para compostagem acelerada, em escalas maiores, são os reatores ou digestores biológicos e as leiras estáticas aeradas.

Conforme Kiehl (2004), o processo de compostagem acelerada utilizando reatores é recomendado para cidades com mais de 200 mil habitantes, pois apresenta um alto investimento e processa maiores quantidades de lixo orgânico diariamente, por onde emprega-se uma metodologia especial para o tratamento do lixo domiciliar, tendo como principais funções: mistura do lixo; fragmentação de materiais frágeis; uniformizar a umidade e temperatura; promover a aeração do lixo.

Já o sistema de leiras estáticas aeradas consiste em misturar o lodo e os resíduos em uma tubulação perfurada onde é conectada a um soprador industrial. Com isso, a aeração necessária para o processo de compostagem nas leiras estáticas será fornecida por este sistema de injeção de ar, podendo ser sob pressão ou por sucção (FERNANDES, 1999).

Com o avanço das tecnologias, os componentes eletrônicos e equipamentos disponíveis no mercado foram ganhando força, proporcionando a criação de novos sistemas para este tipo de processo. Em 2015, a empresa Trasix lançou a composteira automática Decomposer GG-02, conforme mostra a Figura 10, a qual não utiliza produtos químicos, apenas agitação, calor e fluxo de ar, com o objetivo de transformar resíduos orgânicos em adubo em menos de 24 horas. A composteira vem com uma serragem que precisa ser colocada somente na instalação do equipamento, sem necessidade de reposição de filtros, serragem ou folhas (TRASIX, 2023).

Figura 10 - Composteira automática Trasix Decomposer GG-02.



Fonte: Trasix (2023).

Esta composteira possui um custo significativo, sendo avaliada em cerca de R\$ 8.000,00. Esse investimento considerável condiz com a qualidade e as funcionalidades avançadas que o produto proporciona para o processo de compostagem, auxiliando em sua a otimização e qualidade.

A mesma empresa também trouxe ao mercado modelos de composteiras com capacidade diária de compostagem acima de 800 kg de resíduos orgânicos, conforme mostra a Figura 11. Esse modelo de composteira também transforma resíduos orgânicos em adubo em menos de 24 horas, reduzindo em até 90% do volume, transformando em um fertilizante rico em nutrientes.

Figura 11 - Composteira automática Trasix GG-300s.



Fonte: Trasix (2023).

A empresa Pela lançou em 2021 o Lomi, conforme ilustra a Figura 12, uma composteira eletrodoméstica que utiliza sensores de temperatura e umidade para otimizar o ambiente dos microrganismos decompositores, contando também com um fluxo de ar contínuo e dispositivos mecânicos para triturar e girar o composto, transformando os resíduos orgânicos em adubo em apenas 24 horas (DRUMOND, 2021).

Figura 12 - Lomi, composteira eletrodoméstica.



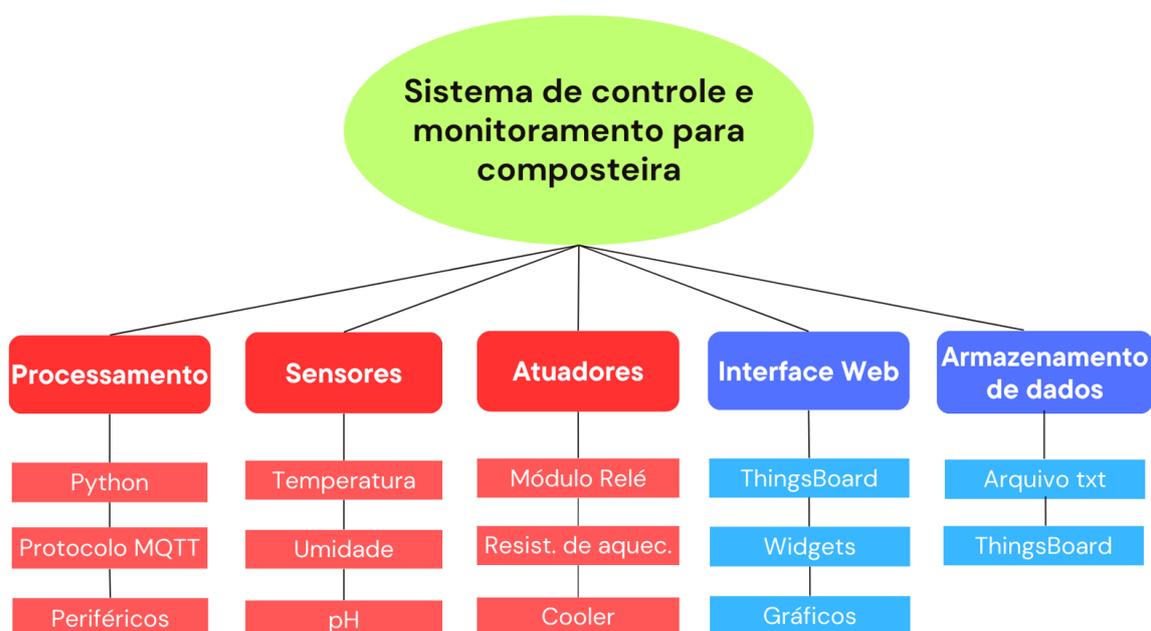
Fonte: Drumond (2021).

3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O propósito deste trabalho é criar um sistema de controle e monitoramento de baixo custo para o processo de compostagem aeróbia em uma composteira. Neste capítulo, serão detalhados os componentes que compõem o desenvolvimento deste projeto, juntamente com o processo de sua construção.

Na Figura 13 abaixo, é possível visualizar o organograma que ilustra os principais componentes do sistema proposto.

Figura 13 - Organograma completo do sistema proposto.



Fonte: Do Autor.

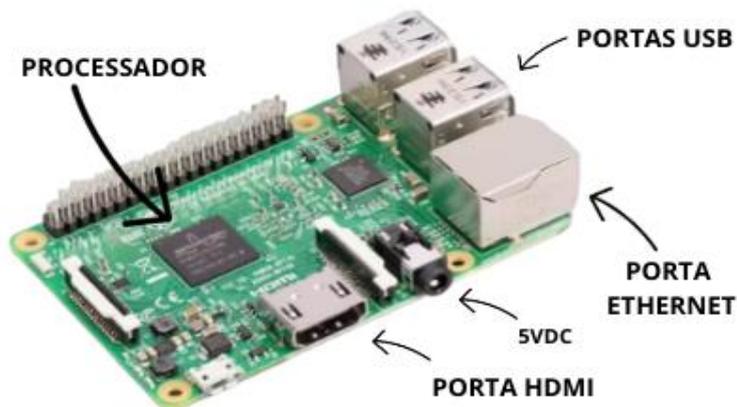
O projeto conta com cinco partes principais, as quais são apresentadas a seguir e descritas nas seções seguintes:

1. Processamento
2. Sensores
3. Atuadores
4. Interface *web*
5. Armazenamento de dados

3.1 Processamento

A Raspberry Pi 3 Model B, ilustrada na Figura 14, é um computador de placa única compacto e versátil desenvolvido pela Raspberry Pi Foundation. Possui um processador Quad Core 1,2GHz, o Broadcom BCM2837 CPU de 64 bits, memória de 1GB RAM, 4 portas USB para a conexão de periféricos, como mouse, teclado e uma porta HDMI, para conectar com monitor de computador ou televisão, proporcionando uma melhor interação do usuário com o sistema. Além disso, ela possui 40 pinos GPIO, os quais podem ser conectados com diversos sensores e dispositivos.

Figura 14 - Placa Raspberry Pi 3 Model B.



Fonte: Do autor.

Com o objetivo de facilitar o monitoramento e o controle dos sensores e atuadores da composteira de maneira remota, justificada também pela conectividade *Wi-Fi* e rede local (LAN), optou-se por empregar a placa Raspberry Pi 3 Model B. Esta placa é responsável por coletar e processar os dados dos sensores e atuadores, transmiti-los para a interface *web* e armazenar os dados obtidos.

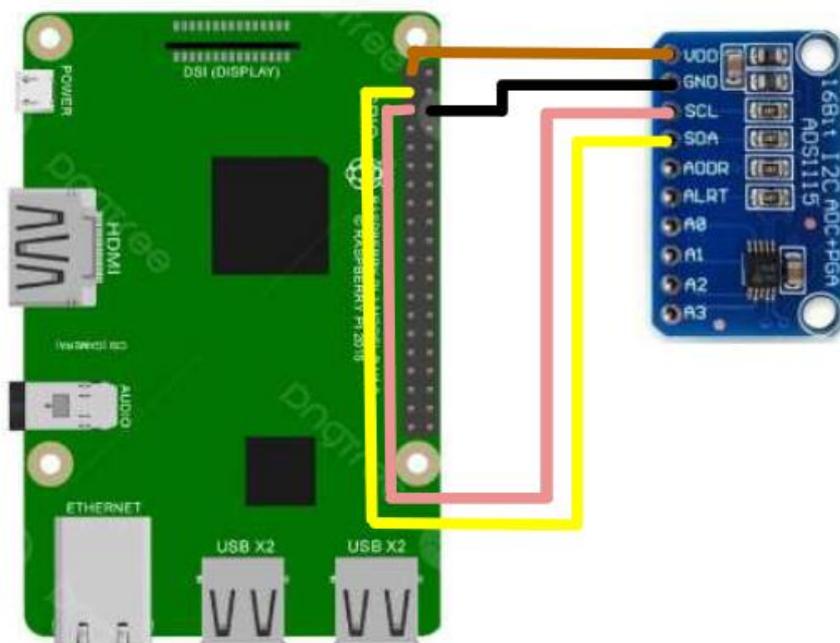
O sistema operacional instalado na Raspberry Pi 3 para este projeto foi o próprio Raspberry Pi OS, o qual é baseado no Debian Linux, possuindo uma maior estabilidade e suporte a maioria dos programas e periféricos. Sua instalação é realizada diretamente no cartão microSD, localizado na parte inferior da placa, e iniciada na Raspberry Pi 3.

O projeto foi elaborado utilizando a linguagem de programação Python, e a plataforma Thonny foi escolhida como ambiente de desenvolvimento, previamente instalada no Raspberry Pi OS. Além disso, para estabelecer a comunicação com a interface *web*, optou-se pela implementação do protocolo MQTT, devido à sua eficiência e confiabilidade na transmissão dos dados.

Devido à ausência de entradas analógicas na Raspberry Pi 3, é necessário conectar um conversor A/D para coletar os dados dos sensores de umidade do solo e pH, já que esses sensores operam de forma analógica. O dispositivo utilizado para esta finalidade foi o ADS1115, o qual é responsável por converter os sinais analógicos em dados digitais, proporcionando 4 canais de saída disponíveis e se comunicando por meio do protocolo I2C.

A Figura 15 representa o esquema de conexão entre a Raspberry Pi 3 e o conversor A/D.

Figura 15 - Conexão da Raspberry Pi 3 com o conversor ADS1115.



Fonte: Do autor.

Para utilizar este conversor, foi instalada a biblioteca Adafruit_ADS1x15 na Raspberry Pi e, em seguida, os canais de saída foram configurados, conforme ilustrado na Figura 16, sendo o canal “0” para a leitura do sensor de umidade do solo e o canal “1” para a leitura do sensor de pH.

Figura 16 - Configuração dos canais de saída do conversor ADS1115.

```
### Leitura do barramento i2c e definição dos canais ###  
i2c = busio.I2C(board.SCL, board.SDA)  
ads = ADS.ADS1115(i2c)  
canal0 = 0  
canal1 = 1
```

Fonte: Do autor.

3.2 Sensores

Visando garantir um monitoramento preciso e eficaz do processo de compostagem, a composteira é equipada com sensores de temperatura, umidade do solo e pH, os quais foram posicionados dentro dos resíduos orgânicos, conforme ilustra a Figura 17, facilitando o processo de teste e manuseio.

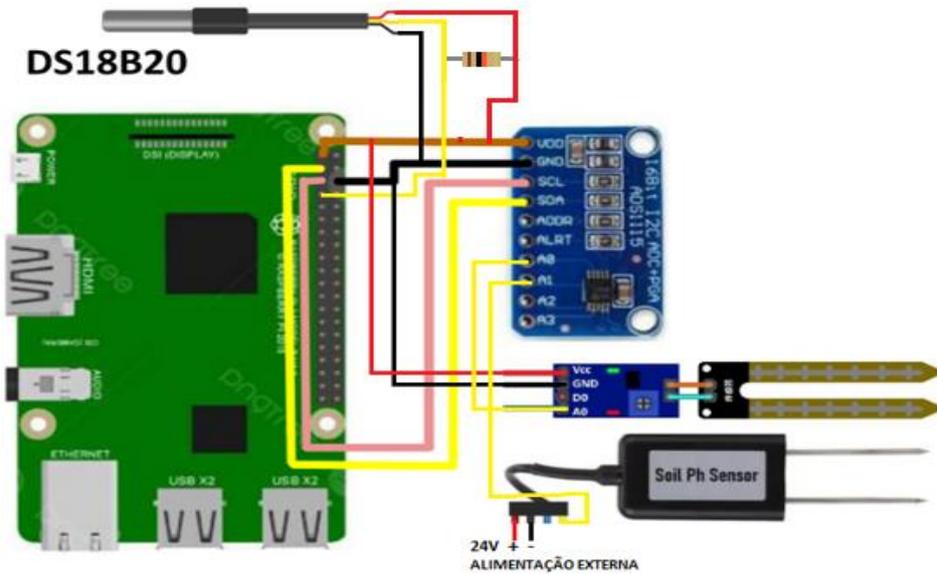
Figura 17 - Posicionamento dos sensores na composteira.



Fonte: Do autor

As especificações e o modo de operação dos sensores utilizados neste projeto serão detalhados nas seções seguintes, enquanto as conexões dos sensores com a Raspberry Pi estão representadas na Figura 18 a seguir.

Figura 18 - Conexão dos sensores com a Raspberry Pi 3.



Fonte: Do autor

Nessa configuração, é importante destacar que o sensor de temperatura DS18B20 é conectado em paralelo a um resistor de *pull-up* de 10 k Ω . Dessa forma, o sinal permanece em um estado lógico alto quando não estiver ativamente transmitindo dados.

3.2.1 Sensor de temperatura DS18B20

O sensor de temperatura digital DS18B20, o qual pode ser visualizado na Figura 19, será responsável pelo monitoramento da temperatura dos resíduos orgânicos. Este sensor é revestido em aço inoxidável impermeável, tornando-o adequado para ambientes rigorosos e úmidos, sendo uma escolha ideal para inserção do mesmo no sistema proposto.

Figura 19 - Sensor de temperatura DS18B20.



Fonte: Lousada (2020).

De acordo com as especificações fornecidas pelo fabricante, este sensor é capaz de operar em ambientes extremos, com uma faixa de temperatura que varia de -55 °C a +125 °C. Possui uma margem de erro de apenas $\pm 0,5$ °C, desde que esteja dentro da faixa de -10 °C a +85 °C, garantindo maior precisão e confiabilidade nas leituras. Além disso, conta com um número serial único de 64 bits, permitindo que vários sensores DS18B20 operem em conjunto em um mesmo barramento, ampliando as possibilidades de monitoramento para sistemas maiores e mais complexos.

O sensor DS18B20 utiliza o protocolo *1-Wire* para comunicação, um sistema de barramento semelhante ao i2c, porém, com taxas de dados mais baixas e maior alcance. Ele é capaz de fornecer leituras de temperatura que podem variar entre 9 e 12 bits, possibilitando o monitoramento preciso e a otimização do processo de compostagem, contribuindo para que os resíduos orgânicos alcancem as temperaturas ideais para uma decomposição eficiente. A função para realizar a leitura deste sensor pode ser visualizada na Figura 20 abaixo.

Figura 20 - Função para obter-se a leitura do sensor DS18B20.

```
### Leitura do sensor de temperatura DS18B20 ###
os.system('modprobe w1-gpio')
os.system('modprobe w1-therm')

base_dir = '/sys/bus/w1/devices/'
device_folder = glob.glob(base_dir + '28*')[0]
device_file = device_folder + '/w1_slave'

def read_temp_raw():
    f = open(device_file, 'r')
    lines = f.readlines()
    f.close()
    return lines

def read_temp():
    lines = read_temp_raw()
    while lines[0].strip()[-3:] != 'YES':
        lines = read_temp_raw()
    equals_pos = lines[1].find('t=')
    if equals_pos != -1:
        temp_string = lines[1][equals_pos+2:]
        temp_c = float(temp_string) / 1000.0
        return (temp_c)
```

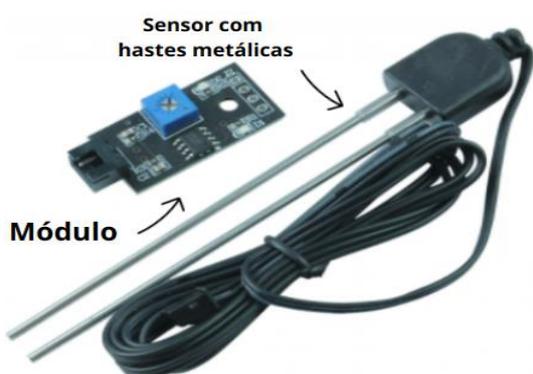
Fonte: Do autor.

A função “read_temp_raw()” é responsável pela leitura dos dados brutos do sensor, enquanto a função “read_temp()” processa e converte esses dados para fornecer a temperatura em graus Celsius. Posteriormente, as informações de temperatura são armazenadas no registro de 2 bytes do sensor.

3.2.2 Sensor de umidade do solo HD-38

Para monitorar a umidade dos resíduos orgânicos, foi utilizado o sensor de umidade do solo HD-38, que também opera em uma faixa de temperatura entre -25 °C e 85 °C. Este sensor, ilustrado na Figura 21, apresenta terminais metálicos anticorrosivos com 90mm de comprimento, facilitando seu contato com os resíduos orgânicos.

Figura 21 - Sensor de umidade do solo HD-38.



Fonte: Do autor.

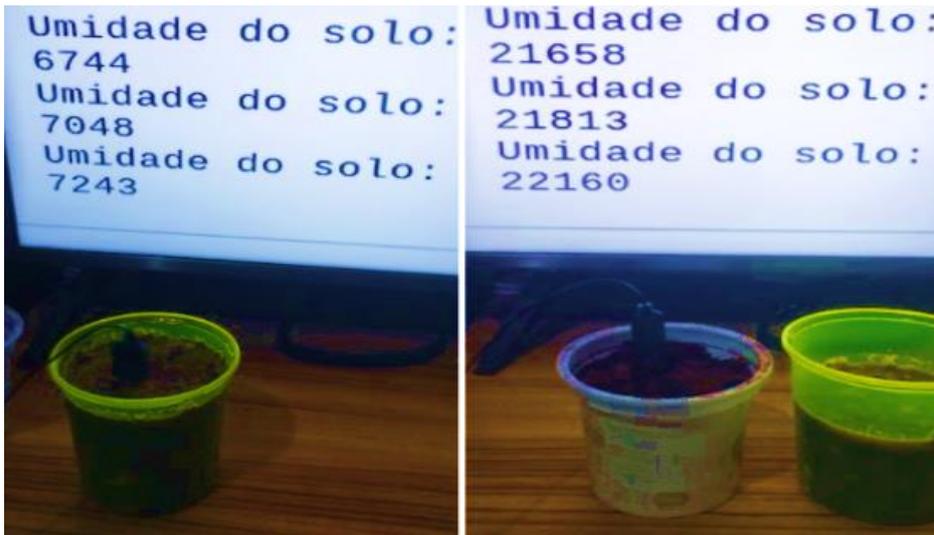
Esse sensor é conectado a um módulo que faz a leitura dos dados gerados pela sonda e a transmite por meio de interface digital ou analógica. Para este projeto, a saída analógica do módulo foi utilizada e conectada ao canal “A0” do conversor ADS1115.

O princípio de funcionamento desse sensor consiste em enviar corrente pelo solo e, em seguida, medir a resistência para determinar o nível de umidade. Quanto mais água houver, maior será a condutividade elétrica do solo (menos resistência), enquanto um solo mais seco tem pouca condutividade elétrica (mais resistência).

A calibração do sensor de umidade do solo foi realizada utilizando um método semelhante ao de Pereira (2023), onde foram utilizados dois recipientes: um contendo terra completamente seca e o outro com terra totalmente molhada.

Os valores registrados pelo sensor, lidos através do canal “0” do conversor ADS1115, em ambos os recipientes estão representados na Figura 22. No recipiente contendo terra seca, os valores máximos foram de aproximadamente 22500, enquanto no recipiente com terra completamente molhada, os valores mínimos registrados foram de aproximadamente 6500.

Figura 22 - Valores registrados pelo sensor de umidade do solo HD-38.



Fonte: Do autor.

Para calcular os níveis de umidade do solo, foi utilizada a função apresentada na Figura 23. Nesta função, o valor mínimo de 6500 (indicando alta umidade) representa 100% de umidade, enquanto o valor máximo de 22500 (indicando baixa umidade) corresponde a 0% de umidade.

Figura 23 - Função para calcular os valores obtidos pelo sensor HD-38.

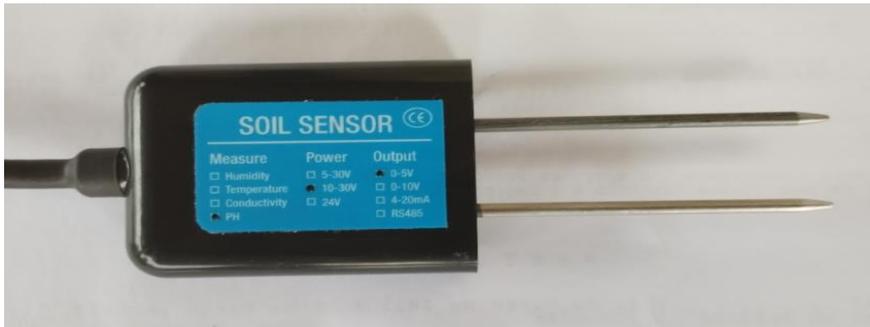
```
### Cálculo umidade do solo ###  
def calcular_umidade(valor1):  
    valor_min = 22500  
    valor_max = 6500  
    umidade_min = 0  
    umidade_max = 100  
  
    umidade = ((valor1 - valor_min) / (valor_max - valor_min)) * (umidade_max - umidade_min) + umidade_min  
    return umidade
```

Fonte: Do autor.

3.2.3 Sensor de pH CWT-SOIL-PH-V5

Com o intuito de avaliar a acidez ou alcalinidade dos resíduos orgânicos, foi empregado o sensor de pH do solo tipo PH-V5, apresentado na Figura 24, fabricado pela empresa chinesa ComWinTop.

Figura 24 - Sensor de pH do solo PH-V5.



Fonte: Do autor.

Este sensor opera com uma faixa de temperatura entre -40 °C a 80 °C, e, requer uma tensão de alimentação entre 10V e 30V. É capaz de medir valores de pH na faixa de 3 a 9, com uma precisão de +/- 0,3 pH, transmitindo essas informações por meio de um sinal de saída de 0-5V. Além disso, o sensor conta com classificação de proteção IP68 e é encapsulado por uma resina de alta densidade, tornando-o adequado para ambientes úmidos.

Para realizar a calibração, o sensor foi testado em três recipientes diferentes: um contendo solo com refrigerante de cola (pH baixo), outro com serragem (pH neutro) e um terceiro com solo misturado a água sanitária (pH alto). O recipiente com solo e refrigerante de cola registrou valores em torno de 15.000 (Apêndice A), enquanto o recipiente com serragem mostrou valores próximos a 22.000 (Apêndice B). Por fim, o recipiente com solo e água sanitária apresentou valores aproximados de 30.000 (Apêndice C).

Conforme mencionado anteriormente, a leitura deste sensor foi configurada para o canal "1" do conversor ADS1115, e a função desenvolvida para calcular os valores de pH pode ser visualizada na Figura 25.

Figura 25 - Função para calcular os valores obtidos pelo sensor PH-V5.

```
### Cálculo pH do solo ###
def calcular_ph(valor2):
    valor_min = 14000
    valor_max = 33000
    ph_min = 3
    ph_max = 9

    ph = ((valor2-valor_min)/(valor_max-valor_min)) * (ph_max-ph_min) + ph_min

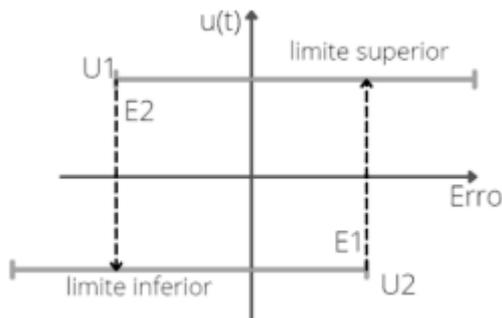
    return ph
```

Fonte: Do autor.

3.3 Atuadores

O desenvolvimento do controle do sistema foi baseado no método *on-off* com histerese, que pode ser visualizado na Figura 26. Esse controle baseia-se em ligar o dispositivo até atingir o ponto de desativação, onde uma banda de histerese é definida para evitar comutações frequentes.

Figura 26 - Curva de histerese em controlador de ação *on/off*.



Fonte: Do autor.

Com o objetivo de criar um ambiente favorável para a decomposição dos resíduos orgânicos, foram instalados dispositivos para controlar a temperatura e a ventilação da composteira, os quais serão apresentados nas próximas seções.

3.3.1 Módulo relé

Para efetuar as operações de controle automatizado neste sistema, foi empregado um módulo relé 5V, conforme ilustrado na Figura 27.

Figura 27 - Módulo relé 5V de 8 canais.



Fonte: Do autor.

Este módulo possui 8 relés que podem controlar cargas elétricas maiores e são acionados pelos seus canais de saída. Sua operação é em nível lógico baixo (*low*), ou seja, o módulo ativa a saída do canal quando recebe um sinal de baixa tensão.

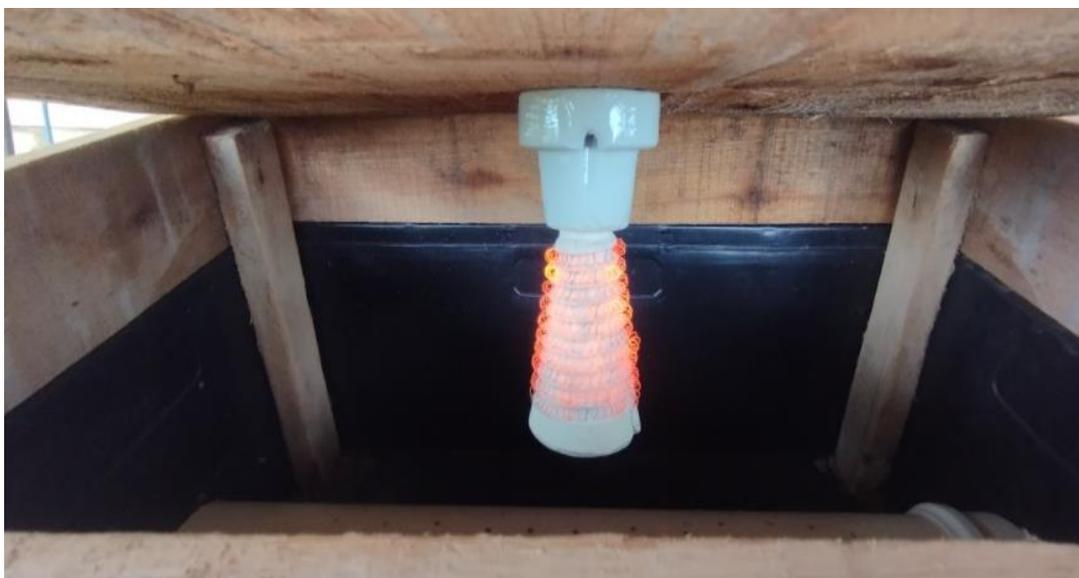
Para controlar os canais do módulo, foram programados comandos que possuem a função de acionar os relés e, conseqüentemente, a resistência de aquecimento e o *cooler* que foram instalados na composteira, promovendo a temperatura e aeração ideais para o processo.

O módulo relé foi programado para operar nos seus dois primeiros canais: o canal “1” controla a resistência de aquecimento, ligada a GPIO 17 da Raspberry Pi, enquanto o canal “2” aciona o *cooler*, conectada a GPIO 22 da placa.

3.3.2 Resistência de aquecimento

Diante da necessidade de elevar a temperatura para acelerar a atividade microbiana no processo de compostagem, foi implementada uma resistência elétrica ao sistema, conforme ilustrado na Figura 28, criando um ambiente propício aos microrganismos. Essa resistência foi instalada na parte superior da estrutura e é responsável por aquecer os resíduos orgânicos, contribuindo com o aumento da temperatura quando a atividade dos microrganismos não é suficiente.

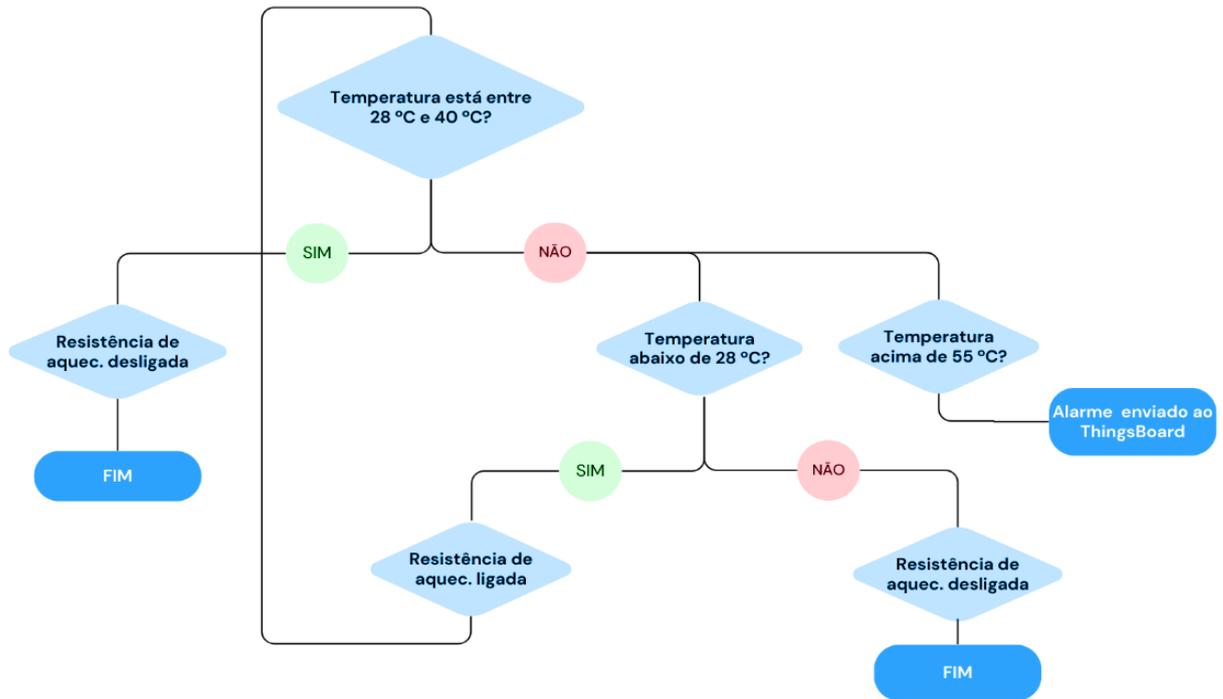
Figura 28 - Resistência elétrica instalada na parte superior da estrutura.



Fonte: Do autor.

Esse controle térmico promove a eficiência do processo e garante a produção de um adubo orgânico seguro e de alta qualidade para uso na agricultura e jardinagem. A Figura 29 a seguir apresenta o fluxograma elaborado para controlar a temperatura do sistema.

Figura 29 - Fluxograma para controle de temperatura.



Fonte: Do autor.

3.3.3 Ventilação forçada

Assim como a resistência de aquecimento induz o aumento de temperatura, uma aeração adequada também desempenha um papel importante nesse controle, evitando superaquecimento do sistema. Além disso, a circulação de ar promove a introdução de oxigênio aos microrganismos aeróbios, reduz odores desagradáveis, melhora a qualidade do composto e evita a compactação dos resíduos orgânicos, mantendo espaços de ar entre os materiais.

Dessa forma, para proporcionar uma ventilação completa de toda a matéria orgânica, foi instalado um *cooler* na base do sistema, ao qual foi conectado um tubo de PVC com 100 mm de diâmetro, contendo diversas perfurações pequenas. Esse

sistema é posicionado no centro da composteira, como ilustrado na Figura 30, de modo a estar situado no centro da matéria orgânica.

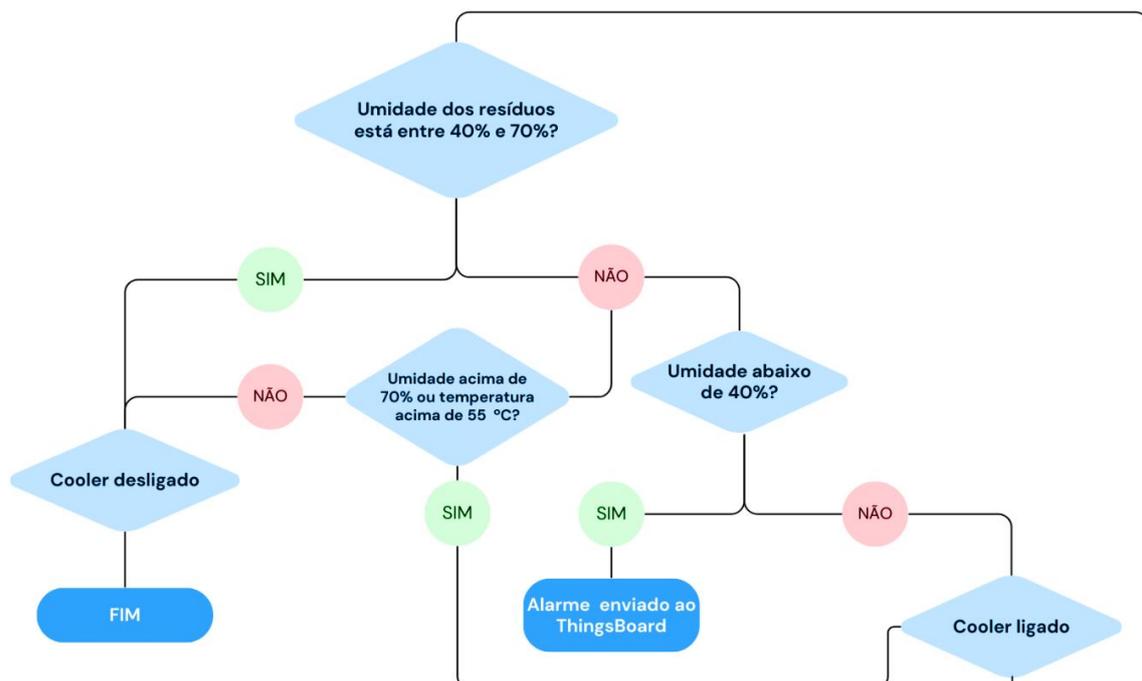
Figura 30 - Cooler e cano PVC instalados na base da estrutura.



Fonte: Do autor.

O fluxograma apresentado na Figura 31 detalha o procedimento implementado para controlar a ventilação forçada no sistema.

Figura 31 - Fluxograma para controle de ventilação forçada.



Fonte: Do autor.

3.4 Interface web

A interface *web* foi desenvolvida utilizando a plataforma de código aberto ThingsBoard, em sua versão *demo*. Essa plataforma oferece diversas funcionalidades, permitindo a coleta, processamento, visualização e gerenciamento de dispositivos e dados. O ThingsBoard oferece conectividades a dispositivos por meio de protocolos padrão da Internet das Coisas (IoT), tais como MQTT, CoAP e HTTP, oferecendo suporte a implantações tanto de armazenamento *cloud* quanto locais, proporcionando flexibilidade e adaptabilidade aos requisitos específicos do projeto.

Como mencionado anteriormente, o protocolo de comunicação MQTT foi utilizado nesse projeto. A Figura 32 apresenta a configuração de conexão da Raspberry Pi ao ThingsBoard via protocolo MQTT. Neste caso, é importante destacar que não foi preciso instalar um *broker* MQTT dedicado, uma vez que a plataforma possui a capacidade de atuar como um *broker* integrado.

Figura 32 - Conexão da Raspberry Pi ao ThingsBoard via protocolo MQTT.

```
### INFORMAÇÕES PARA CONEXÃO COM A PLATAFORMA THINGSBOARD ###
THINGSBOARD_HOST = 'demo.thingsboard.io'
ACCESS_TOKEN = '4JlWxm7ZW3nQommcSSQk'
topic = 'v1/devices/me/telemetry'

client = mqtt.Client()

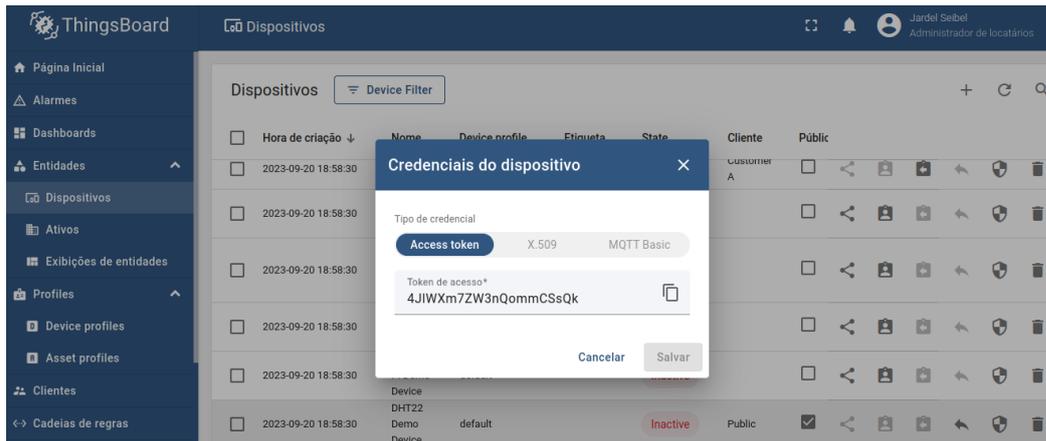
### Token de Acesso ###
client.username_pw_set(ACCESS_TOKEN)

### Conexão ao ThingsBoard usando o protocolo MQTT em um intervalo de 60s ###
client.connect(THINGSBOARD_HOST, 1883, 60)
client.loop_start()
```

Fonte: Do autor.

Para estabelecer a conexão com o ThingsBoard é necessário um *token* de acesso, que pode ser obtido na seção “Entidades” da plataforma, onde é selecionado o dispositivo do qual se pretende enviar os dados, conforme demonstrado na Figura 33 a seguir.

Figura 33 - Token de acesso do dispositivo.



Fonte: Do autor.

O *topic* (tópico) é a sequência de caracteres que indica o destinatário das mensagens em um servidor MQTT. Neste contexto, ele é utilizado para estabelecer uma comunicação organizada e eficiente, onde é indicada a versão do protocolo “v1”, a identificação do dispositivo “device/me” e os tipos de dados que estão sendo transmitidos, como leituras de sensores, que são denominados telemetria “telemetry”.

Para transmissão dos dados foi utilizado o comando “client.publish”, seguido pelo tópico, ao qual os dados devem ser enviados, e em seguida, pelo comando “json.dumps”, que converte o valor lido pelo sensor para uma *string* de formato “JSON”, para que possa ser transmitido pela rede. Os comandos de publicação para o *dashboard* podem ser visualizados na Figura 34 a seguir.

Figura 34 - Comando para envio dos dados de monitoramento ao ThingsBoard.

```
sensor_temp['temperatura'] = temperatura
sensor_umid['umidade'] = umidade
sensor_ph['ph'] = ph

client.publish(topic, json.dumps(sensor_temp), 1)
client.publish(topic, json.dumps(sensor_umid), 1)
client.publish(topic, json.dumps(sensor_ph), 1)
```

Fonte: Do autor.

O valor “1” utilizado ao final do comando representa o nível de QoS (*Quality of Service*) no protocolo MQTT, indicando que a mensagem será entregue pelo menos uma vez ao destinatário.

A transmissão dos comandos para indicar o estado dos atuadores ao ThingsBoard segue a mesma estratégia, conforme pode ser visto na Figura 35. Nesse processo, as condições de “High” ou “Low”, para a resistência elétrica, e “True” ou “False” para o *cooler*, são transmitidas continuamente para informar o status dos dispositivos ao LED indicador no painel.

Figura 35 - Comando para envio dos dados de atuação ao ThingsBoard.

```
### Ativar e desativar Led indicador no ThingsBoard ###
def ligar_resistencia():
    GPIO.output(res_aquec, GPIO.LOW)
    client.publish("v1/devices/me/telemetry", '{"resistencia": true}')

def ligar_cooler():
    GPIO.output(cooler, False)
    client.publish("v1/devices/me/telemetry", '{"cooler": true}')

def desligar_resistencia():
    GPIO.output(res_aquec, GPIO.HIGH)
    client.publish("v1/devices/me/telemetry", '{"resistencia": false}')

def desligar_cooler():
    GPIO.output(cooler, True)
    client.publish("v1/devices/me/telemetry", '{"cooler": false}')
```

Fonte: Do autor.

A plataforma disponibiliza diversos *widgets* personalizáveis, que são elementos gráficos e visuais os quais exibem informações específicas, podendo ser associados aos dispositivos e sensores conectados a Raspberry Pi. Com esses *widgets*, é possível criar painéis de controle interativos, permitindo a geração de gráficos.

As variáveis inseridas no início da função da Figura 35 indicam as chaves que são atribuídas nos *widgets* criados. Para elaboração do sistema foi criado um *dashboard*, onde foram adicionados *widgets* de controle, monitoramento e gráficos, aos quais foram atribuídos os dados que foram enviados. Na Figura 36 a seguir pode ser observado como a chave é atribuída ao *widget*.

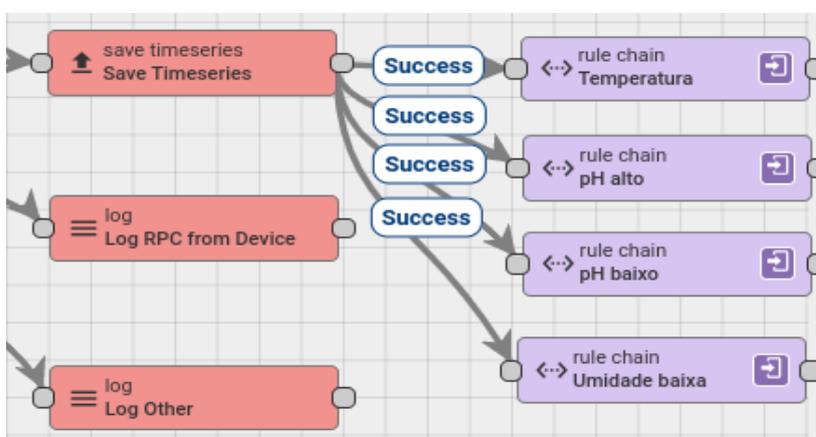
Figura 36 - Chave a ser atribuída no *widget* de monitoramento da temperatura.



Fonte: Do autor.

A plataforma também oferece a funcionalidade de criar alarmes, onde foram desenvolvidos parâmetros que são difíceis de ajustar automaticamente, como níveis de pH muito altos ou baixos. Além disso, foram implementados alertas para notificar quando a temperatura atinge níveis muito altos ou quando a umidade está muito baixa. A Figura 37 a seguir apresenta uma visualização dos alarmes criados.

Figura 37 - Alarmes criados na plataforma ThingsBoard.

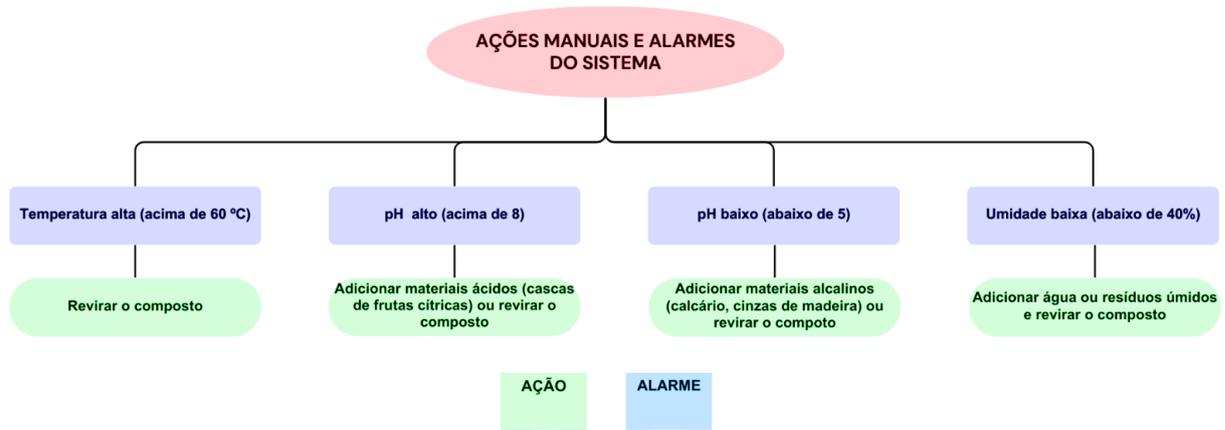


Fonte: Do autor.

As notificações dos alarmes podem ser visualizadas diretamente na plataforma. Ainda assim, foi incorporado um *widget* para facilitar a exibição dos horários em que esses eventos ocorrem. O organograma na Figura 38 abaixo detalha os parâmetros

dos alarmes criados, assim como as ações que o usuário deve adotar em cada situação.

Figura 38 - Organograma com os parâmetros e ações dos alarmes criados.



Fonte: Do autor.

Além das diversas funcionalidades e benefícios disponibilizados pela plataforma, ela também oferece acessibilidade a dispositivos móveis, promovendo a capacidade de acessar os dados de forma eficiente por meio de *smartphones* e *tablets*, tornando-a uma escolha excelente para este projeto. Dessa forma, o painel desenvolvido pode ser visualizado na Figura 39, ilustrando a integração bem-sucedida dos dispositivos com a plataforma.

Figura 39 - *Dashboard* desenvolvido na plataforma ThingsBoard.



Fonte: Do autor.

3.5 Armazenamento de dados

A plataforma ThingsBoard oferece *widgets* que facilitam a criação de gráficos personalizados para os dispositivos associados. Isso permite que o histórico de monitoramento dos últimos 30 dias seja visualizado em cada gráfico, não sendo necessária a criação de um banco de dados independente para acessar esses dados em tempo real. Diante disso, tornou-se evidente a importância de armazenar os dados localmente na Raspberry Pi, pois, caso ocorra alguma desconexão com a rede, os dados podem ser acessados e visualizados diretamente a partir deste arquivo.

Dessa forma, foi implementada uma função para armazenar os dados de monitoramento (temperatura, umidade e pH) a cada hora em um arquivo "txt", o qual pode ser acessado a qualquer momento na pasta local do administrador na Raspberry Pi. A função foi criada para enviar os dados a um arquivo pré-existente na pasta, denominado "dados.txt", e pode ser visualizada na Figura 40 abaixo.

Figura 40 - Função para armazenamento dos dados de monitoramento.

```
if (tempoDecorrido2 >= 3600):
    data_e_hora = datetime.datetime.now().strftime("%d-%m-%Y %H:%M:%S")

    with open('dados.txt', 'a') as arquivo:
        arquivo.write(f'{data_e_hora} - Temperatura: {temperatura} / Umidade: {umidade} / pH: {ph}\n')

    print("dados escritos")
    cont2 = 0
```

Fonte: Do autor.

3.6 Controle automatizado

O sistema de controle de temperatura foi projetado para manter os níveis entre 28 °C e 40 °C, para evitar danificar a estrutura da composteira, considerando que a resistência é um dispositivo de alta temperatura. Devido a atividade metabólica dos microrganismos, a temperatura pode ultrapassar os 40 °C, indicando que a atividade microbiana está ativa e liberando calor.

Já o sistema de controle de umidade foi elaborado para manter os níveis entre 40% e 70%. Quando a umidade ultrapassa os 70%, a aeração forçada é ativada

automaticamente, indicando que o material orgânico necessita de resíduos mais secos ou aeração. Caso a umidade caia abaixo de 40%, um alarme é acionado para alertar o usuário, indicando a falta de água ou de resíduos úmidos.

Os algoritmos de temperatura e umidade desenvolvidas podem ser visualizados na Figura 41 abaixo.

Figura 41 - Lógicas para controle de temperatura e umidade.

```
### Lógica para acionamento da resistência de aquecimento ###
if (temperatura < 28):
    ligar_resistencia()
    # print('Resistência ligada')
    GPIO.output(res_aquec, GPIO.LOW)
    cont3 += 1
if (temperatura > 40):
    desligar_resistencia()
    # print('Resistência desligada')
    GPIO.output(res_aquec, GPIO.HIGH)

### Lógica para acionamento da ventilação forçada ###
if (umidade > 70):
    ligar_cooler()
    # print('Ventilação forçada ligada')
    GPIO.output(cooler, False)
else:
    desligar_cooler()
    # print('Ventilação forçada desligada')
    GPIO.output(cooler, True)
```

Fonte: Do autor.

3.7 Análise de custos do sistema implementado

Os custos totais relacionados ao sistema proposto são apresentados na Tabela 2 a seguir, oferecendo uma análise financeira detalhada de cada componente utilizado.

Tabela 2 - Custos totais do sistema proposto.

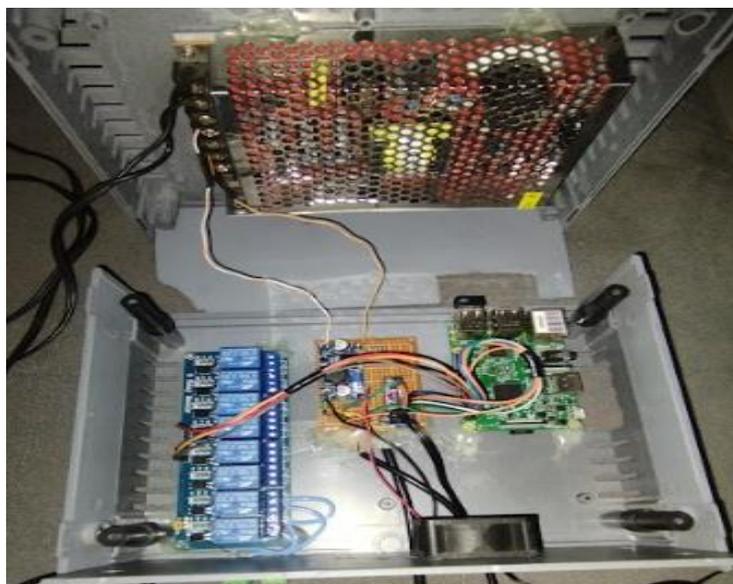
Dispositivo	Quantidade	Preço (R\$)
Composteira doméstica	1	209,90
Raspberry Pi 3 Model B	1	500,00
Sensor pH do solo	1	118,00
Módulo relé 8 canais	1	44,90
Resistência c/ soquete	1	39,90
Cooler 220v	1	37,90
Sensor umidade do solo	1	34,50
Conversor ADS1115	1	26,90
Sensor de temperatura	1	16,50
Total	9	1.028,50

Fonte: Do autor.

3.8 Aquisição de dados

Após a conclusão de todos os testes de bancada necessários para o projeto, a Figura 42 abaixo apresenta a disposição e a montagem dos dispositivos que compõem a estrutura interna do sistema.

Figura 42 - Estrutura interna do sistema proposto.



Fonte: Do autor.

Esse sistema foi projetado para atender composteiras maiores e elétricas, porém, não foi possível elaborar uma estrutura ideal em função dos custos elevados. No entanto, para validação dos resultados, o sistema foi implementado em uma composteira doméstica, conforme ilustra a Figura 43 a seguir.

Figura 43 - Sistema implementado em uma composteira doméstica.



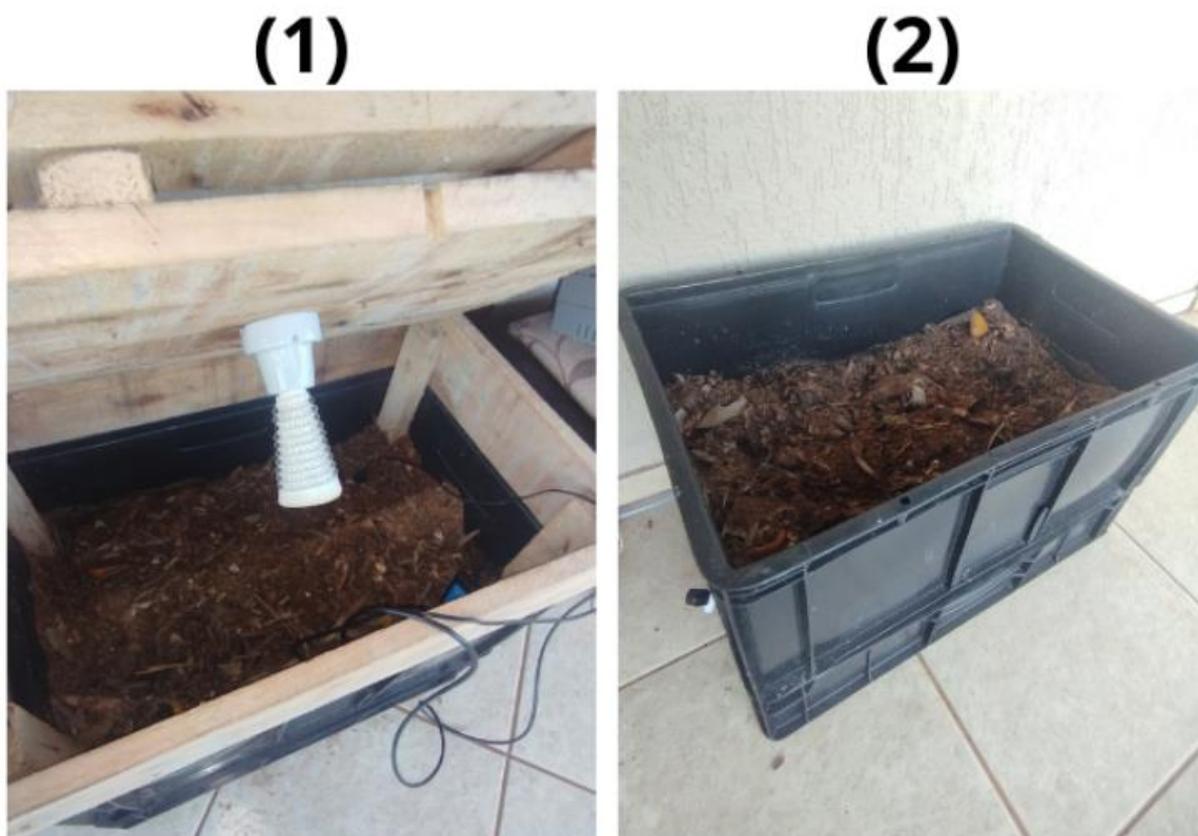
Fonte: Do autor.

Para fins de análise visual comparativa, foram adicionados os mesmos materiais orgânicos em outra composteira doméstica, sem a inclusão do sistema. Na fase inicial, os resíduos orgânicos inseridos em ambas as composteiras foram selecionados para manter uma relação C/N próxima a 25:1. A lista desses materiais está apresentada a seguir:

- 2kg de serragem
- 1kg de material orgânico já decomposto
- 1kg de restos de alimentos orgânicos
- 800g de borra de café úmida
- 500g de cascas de ovo triturado
- 200g de folhas secas

Na Figura 44 abaixo, o item 1 representa a composteira com o sistema integrado, enquanto o item 2 representa a composteira sem o sistema.

Figura 44 - Composteiras domésticas utilizadas para obtenção dos resultados.



Fonte: Do autor.

Os resultados de todo o processo foram visualizados diretamente pelo painel do ThingsBoard, através dos *widgets* e gráficos criados na plataforma, juntamente com o arquivo “dados.txt”, onde os dados foram armazenados. Esses resultados são apresentados no capítulo seguinte, onde as medições realizadas dentro da composteira doméstica foram comparadas com as do sistema implementado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são analisados e discutidos os resultados obtidos pelas diferentes partes do sistema. Inicialmente, são apresentados os resultados da fase inicial do processo, seguidos pelos dados do monitoramento ao longo de 10 dias, incluindo informações sobre alarmes, gráficos e medidas tomadas durante esse período.

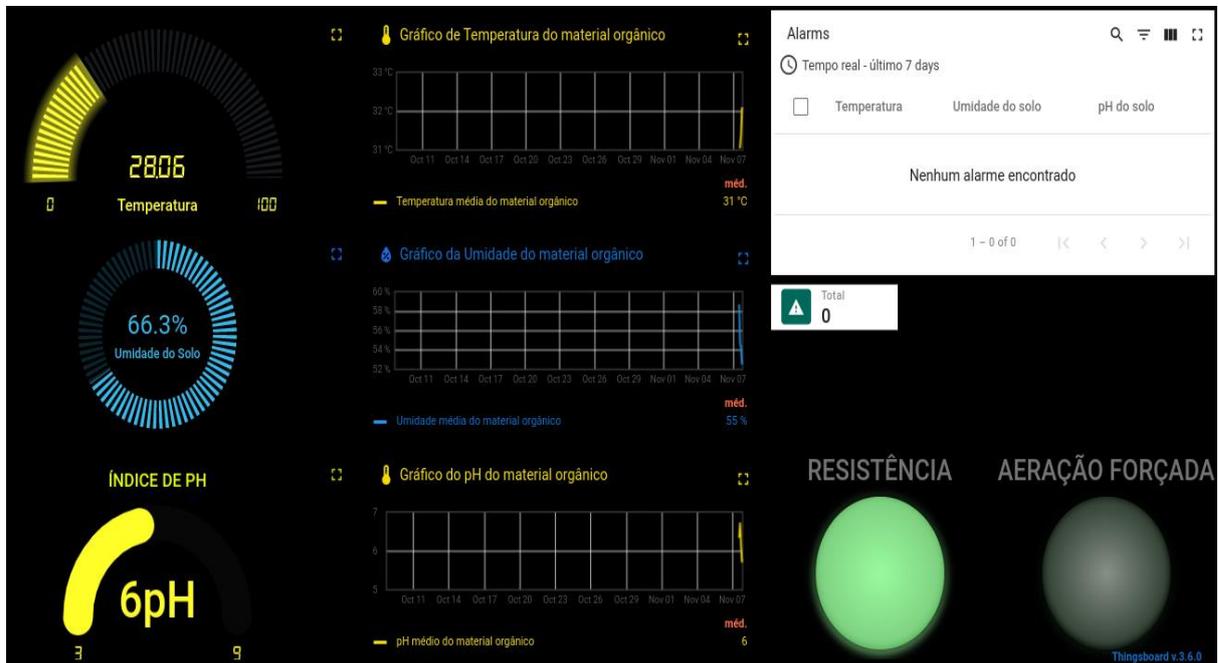
4.1 Fase inicial do processo

O sistema foi projetado para enviar dados dos sensores para o ThingsBoard a cada 20 segundos e, sempre que houver uma mudança nos estados dos dispositivos de atuação, os LEDs indicadores acendem instantaneamente. Além disso, o arquivo “dados.txt” foi criado localmente para armazenar os dados dos sensores a cada hora. Outro aspecto importante a ressaltar é que o sistema foi programado também para acionar a ventilação forçada a cada hora, auxiliando ainda mais na aeração dentro da composteira.

O início do processo de compostagem ocorreu no dia 07/11/2023, onde foram ajustados os parâmetros de umidade dos resíduos orgânicos, a fim de se iniciar já com as condições adequadas. A temperatura encontrava-se abaixo de 28 °C, fazendo com que a resistência de aquecimento já fosse acionada, resultando no aumento da temperatura e criando um ambiente propício para os microrganismos. Além disso, o pH apresentava um índice 6, já indicando uma leve acidez do material orgânico. O painel inicial, mostrado na Figura 45 abaixo, não indicava a ativação de nenhum alarme até aquele momento.

A adição de materiais orgânicos no sistema foi realizada no primeiro dia do processo e depois de 4 dias, tendo como objetivo de ver o comportamento do processo e do sistema após a ocorrência.

Figura 45 - Painel na fase inicial do processo de compostagem.



Fonte: Do autor.

4.2 Resultados iniciais

Para uma análise mais detalhada de cada variável ao longo do período monitorado do processo de compostagem, os resultados de cada uma delas são apresentados separadamente nas subseções a seguir. Os resultados consolidados de todo o sistema são apresentados na última seção do trabalho.

4.2.1 Gráfico da temperatura

No primeiro dia de monitoramento, a temperatura iniciou em uma estabilização próxima a 31 °C. Ao longo do final do dia e da noite, devido à falta de vedação completa na estrutura desenvolvida, resultou em um resfriamento mais rápido dentro da composteira. Dessa forma, o sistema de aquecimento foi acionado

automaticamente para manter a temperatura, evitando exceder 40 °C e ficar abaixo de 28 °C, apresentando uma média de 33 °C ao longo do período.

A Figura 46 ilustra a variação da temperatura durante o período inicial de monitoramento.

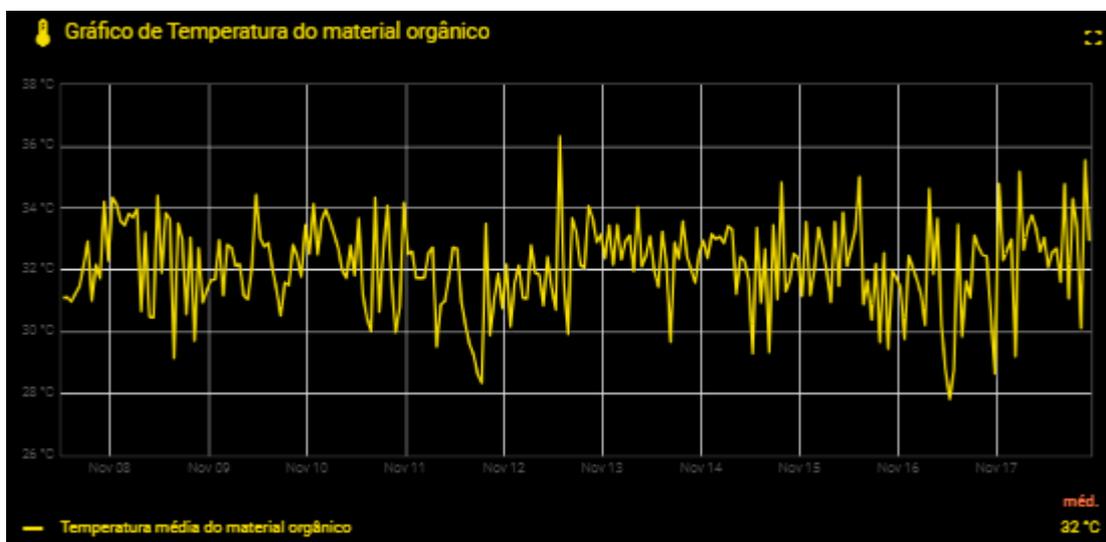
Figura 46 - Variação da temperatura no primeiro dia de monitoramento.



Fonte: Do autor.

Ao longo dos 10 dias, a temperatura apresentou variações que indicaram uma média final de 32 °C, onde os índices puderam indicar uma estabilização do sistema, conforme ilustrado na Figura 47 abaixo.

Figura 47 - Variação da temperatura durante os 10 dias de monitoramento.



Fonte: Do autor.

A temperatura teve suas principais variações no período da noite, como pode ser observado na Figura 45. Dessa forma, pode-se constatar que por ser um período mais frio e também influenciada pela pouca vedação da estrutura, a queda da temperatura foi mais rápida, fazendo com que a resistência fosse acionada mais vezes.

4.2.2 Gráfico da umidade

Conforme pode ser visualizado na Figura 48, no primeiro dia de monitoramento a umidade dos resíduos orgânicos aumentou no início da noite, diminuiu no meio da noite e continuou a aumentar durante o período da manhã. Ao longo do dia, houve um aumento progressivo da umidade, seguido por uma queda significativa ao meio-dia, momento em que mais materiais orgânicos foram adicionados e o composto foi revirado. A umidade apresentou uma média de 60% no primeiro dia, sendo considerado um percentual excelente para o processo de compostagem.

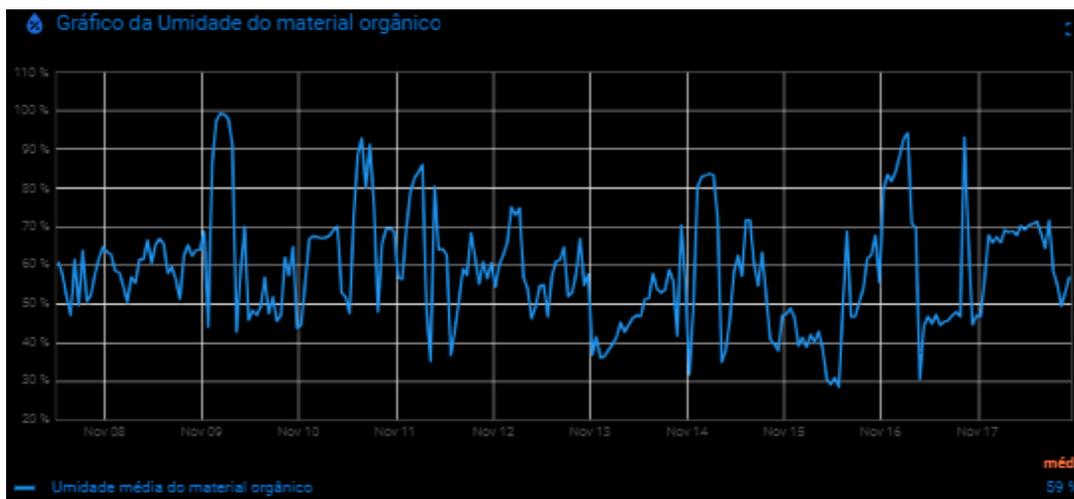
Figura 48 - Variação da umidade no primeiro dia de monitoramento.



Fonte: Do autor.

Como pode ser observado na Figura 49, após 10 dias de monitoramento, o composto apresentou uma média de 59% de umidade, índice considerado ideal para o processo. Em alguns momentos a umidade ultrapassou o limite estabelecido pelo sistema, ou seja, ficou abaixo de 40% ou acima de 70%.

Figura 49 - Variação da umidade durante os 10 dias de monitoramento.



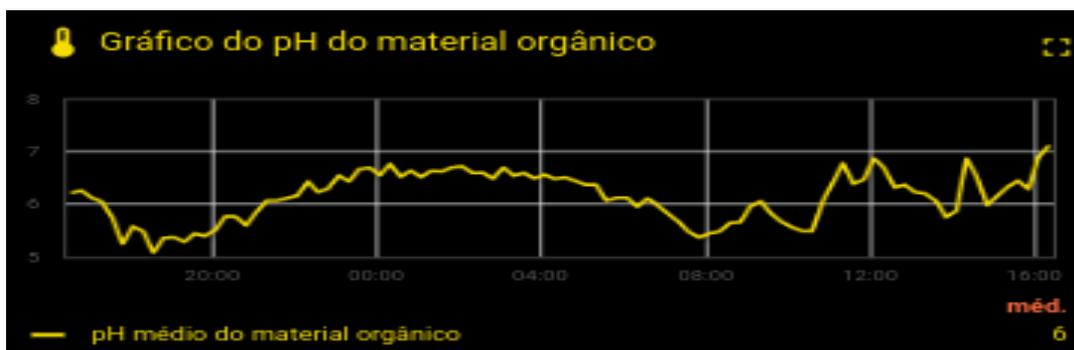
Fonte: Do autor.

O período em que a umidade ficou com índices elevados foram em horários após a meia noite, em função da queda de temperatura. Em contrapartida, índices menos elevados foram obtidos em horários mais quentes, justificado pela maior incidência de temperatura, contribuindo para uma maior evaporação da água presente no solo.

4.2.3 Gráfico do pH

Durante o primeiro dia de monitoramento, o índice de pH permaneceu estável, variando entre 5 e 7, indicando um caráter levemente ácido do material orgânico, com uma média de pH de 6. O gráfico correspondente ao pH ao longo do primeiro dia pode ser observado na Figura 50 abaixo.

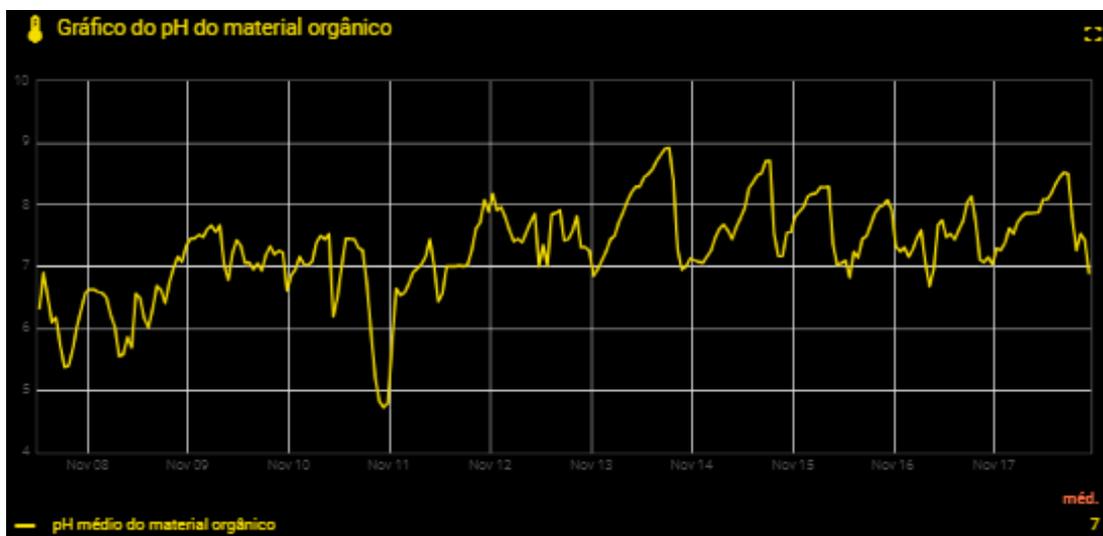
Figura 50 - Variação do pH no primeiro dia de monitoramento.



Fonte: Do autor.

Após 10 dias de monitoramento, pode-se observar na Figura 51 a seguir que o pH apresentou uma média 7, indicando uma neutralidade do composto.

Figura 51 - Variação do pH durante os 10 dias de monitoramento.



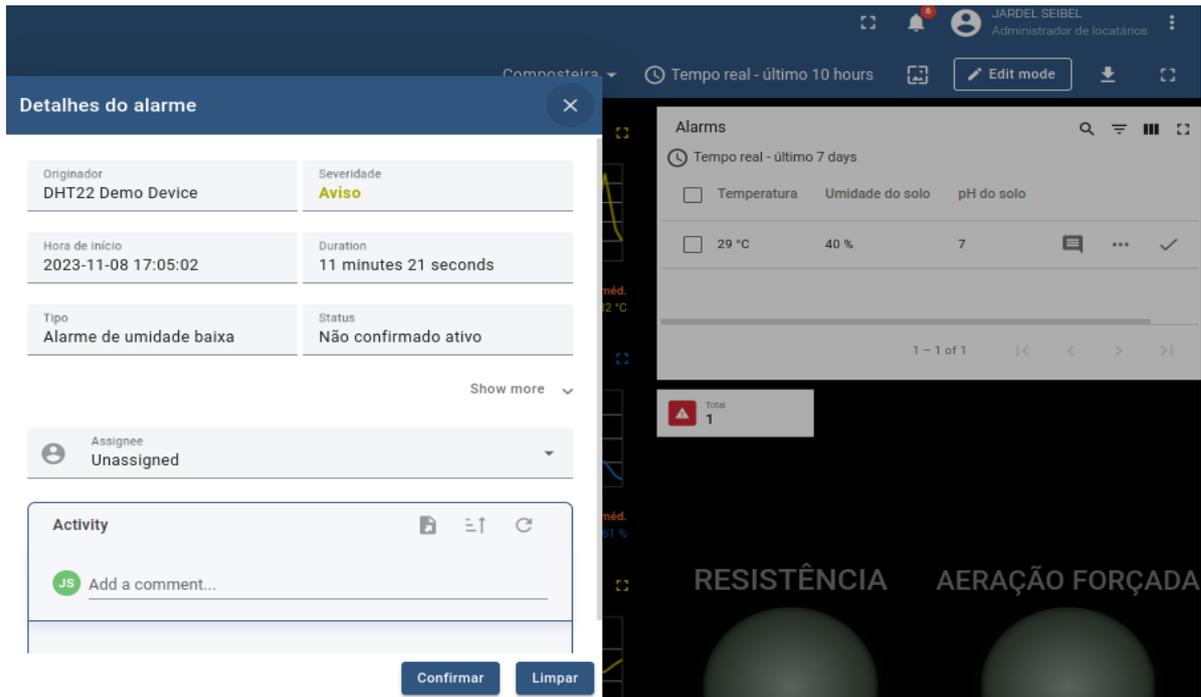
Fonte: Do autor.

O índice de pH teve períodos mais elevados quando foram adicionados mais resíduos orgânicos ao processo, ou seja, na fase inicial e após 4 dias. A partir do quinto dia, o pH teve variações mais constantes em função de serem colocados resíduos mais alcalinos. Dessa forma, o alarme era acionado indicando pH alto e o composto era revirado para diminuir esse índice.

4.2.4 Alarmes

Ao final do primeiro dia de monitoramento, o primeiro alarme foi emitido, conforme ilustrado na Figura 52, indicando a baixa umidade dos resíduos orgânicos. Pode-se observar também que quando o alarme é emitido, os valores de temperatura, umidade e pH são registrados, isso ocorre para qualquer tipo de alarme. Além disso, nos detalhes do alarme são fornecidas outras informações importantes, como o horário de início, duração, severidade, tipo e qual o status.

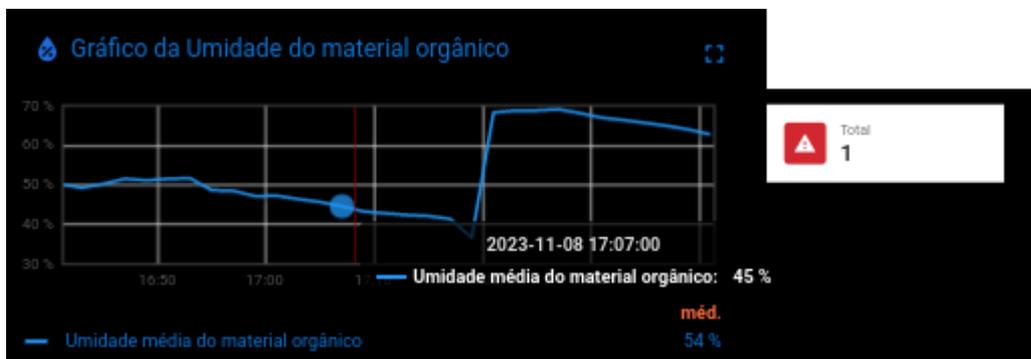
Figura 52 - Primeiro alarme emitido pelo sistema.



Fonte: Do autor.

Após a visualização e confirmação do alarme, foi adicionado um pouco de água e revirado o composto. Dessa forma, o sensor foi inserido novamente na composteira e os valores da umidade foram restabelecidos em aproximadamente 60%, conforme mostra a Figura 53 abaixo.

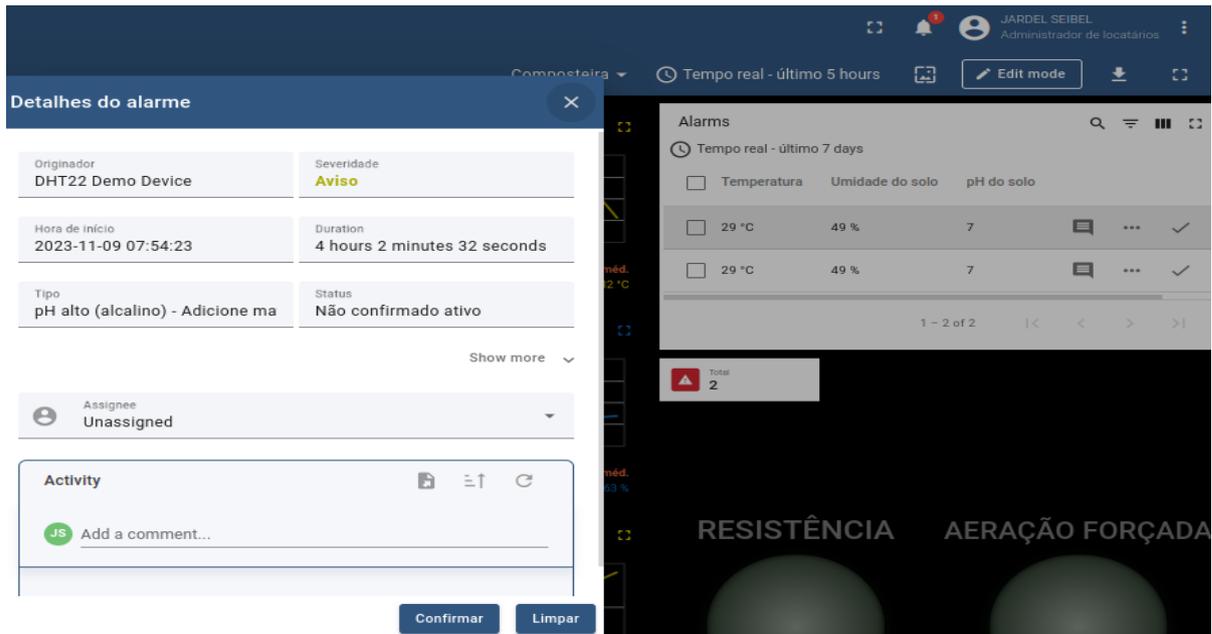
Figura 53 - Valores da umidade após ação condicionada pelo alarme.



Fonte: Do autor.

Outros alarmes foram sendo emitidos ao longo do período de monitoramento, como pode ser observado na Figura 54 a seguir, onde o pH apresentou um índice mais elevado no início do terceiro dia.

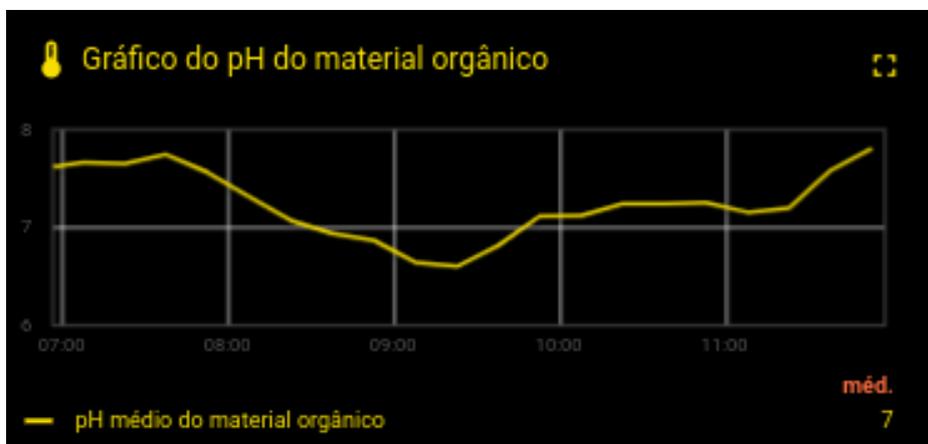
Figura 54 - Segundo alarme emitido pelo sistema.



Fonte: Do autor.

Dessa forma, o composto foi revirado, resultando em uma queda temporária no índice de pH que logo se estabilizou novamente, aproximando-se do valor 8, conforme pode ser visualizado na Figura 55. Esse resultado pode ser considerado uma indicação da transição da fase mesofílica para a termofílica da compostagem.

Figura 55 - Estabilização do índice de pH entre 7 e 8.



Fonte: Do autor.

4.2.5 Armazenamento dos dados obtidos

Os dados contidos no arquivo "txt" referentes a cada hora, durante o primeiro dia de monitoramento, podem ser visualizados na Figura 56 a seguir. Já o restante dos resultados e todo o histórico do período estão no Anexo 1, onde consta o caminho de acesso ao código de programação.

Figura 56 - Dados armazenados no arquivo "txt".

```
07-11-2023 11:30:21 - Temperatura: 31.12 / Umidade: 56.7 / pH: 7.03
07-11-2023 12:30:22 - Temperatura: 31.5 / Umidade: 47.15 / pH: 6.4
07-11-2023 13:39:32 - Temperatura: 31.25 / Umidade: 48.15 / pH: 5.98
07-11-2023 14:39:33 - Temperatura: 31.38 / Umidade: 68.38 / pH: 6.4
07-11-2023 15:39:33 - Temperatura: 31.94 / Umidade: 52.65 / pH: 5.13
07-11-2023 16:39:34 - Temperatura: 31.75 / Umidade: 76.33 / pH: 5.77
07-11-2023 17:39:34 - Temperatura: 31.0 / Umidade: 49.88 / pH: 5.55
07-11-2023 18:39:34 - Temperatura: 30.25 / Umidade: 53.16 / pH: 5.98
07-11-2023 19:39:34 - Temperatura: 30.5 / Umidade: 58.57 / pH: 6.19
07-11-2023 20:39:34 - Temperatura: 28.12 / Umidade: 62.94 / pH: 6.19
07-11-2023 21:39:35 - Temperatura: 34.12 / Umidade: 65.17 / pH: 6.82
07-11-2023 22:39:35 - Temperatura: 40.88 / Umidade: 64.57 / pH: 6.4
07-11-2023 23:39:36 - Temperatura: 28.0 / Umidade: 62.52 / pH: 6.61
```

Fonte: Do autor.

4.2.6 Aspectos visuais

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa ao longo dos 10 dias monitorados, as Figuras 57 e 58 a seguir apresentam visualmente a aparência do composto orgânico no primeiro dia nas duas composteiras: a primeira com o sistema integrado e a segunda sem o sistema, respectivamente.

Figura 57 - Aspecto visual do primeiro dia na composteira com o sistema.



Fonte: Do autor.

Figura 58 - Aspecto visual do primeiro dia na composteira sem o sistema.



Fonte: Do autor.

Após 10 dias de monitoramento, foram registrados os aspectos visuais das duas composteiras novamente, ilustrados nas Figuras 59 e 60 a seguir, respectivamente na ordem conforme anteriormente mencionado.

Figura 59 - Aspecto visual do décimo dia na composteira com o sistema.



Fonte: Do autor.

Figura 60 - Aspecto visual do décimo dia na composteira sem o sistema.



Fonte: Do autor.

4.3 Síntese dos resultados

As diferenças mais significativas entre os resultados das duas composteiras ocorreram nas características de textura, cor, odor e pH presentes em cada húmus. A Figura 61 ilustra detalhadamente a análise dos dois recipientes, exibindo o resultado do húmus de cada composteira ao longo do período de 10 dias.

Figura 61 - Resultado do húmus sem e com o sistema integrado.



Fonte: Do autor.

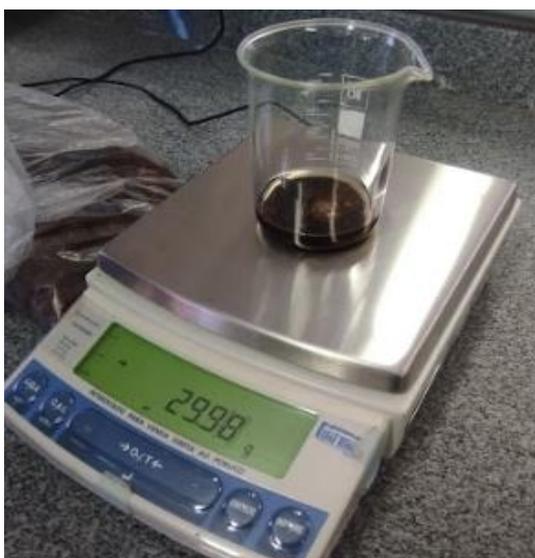
Na embalagem com o húmus da composteira sem o sistema integrado Figura 60 (1), observou-se uma coloração escura e uma textura mais heterogênea, apresentando também odor mais intenso e desagradável. Esses aspectos sugerem um estágio de decomposição ainda em andamento, evidenciando resíduos que ainda não foram completamente decompostos, não atendendo até então os padrões ideais para a utilização como fertilizante.

Já na embalagem com o húmus da composteira com o sistema integrado Figura 60 (2), notou-se um aspecto um pouco menos escuro e uma textura leve, apresentando cheiro terroso agradável. Dessa forma, essas características são indicadores positivos de um composto orgânico bem maturado e adequado para uso como fertilizante.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa e detalhada do pH, foram realizados testes utilizando um pHmetro. Para isso, foram empregados os materiais resultantes da decomposição ao término do processo em ambas as composteiras.

No recipiente utilizado para análise, foram inseridos 3 g de húmus para uma solução líquida composta por 27 ml de água destilada, totalizando cerca de 30 g, como representado na Figura 62 a seguir.

Figura 62 - Recipiente contendo a fração utilizada nos testes de pH.

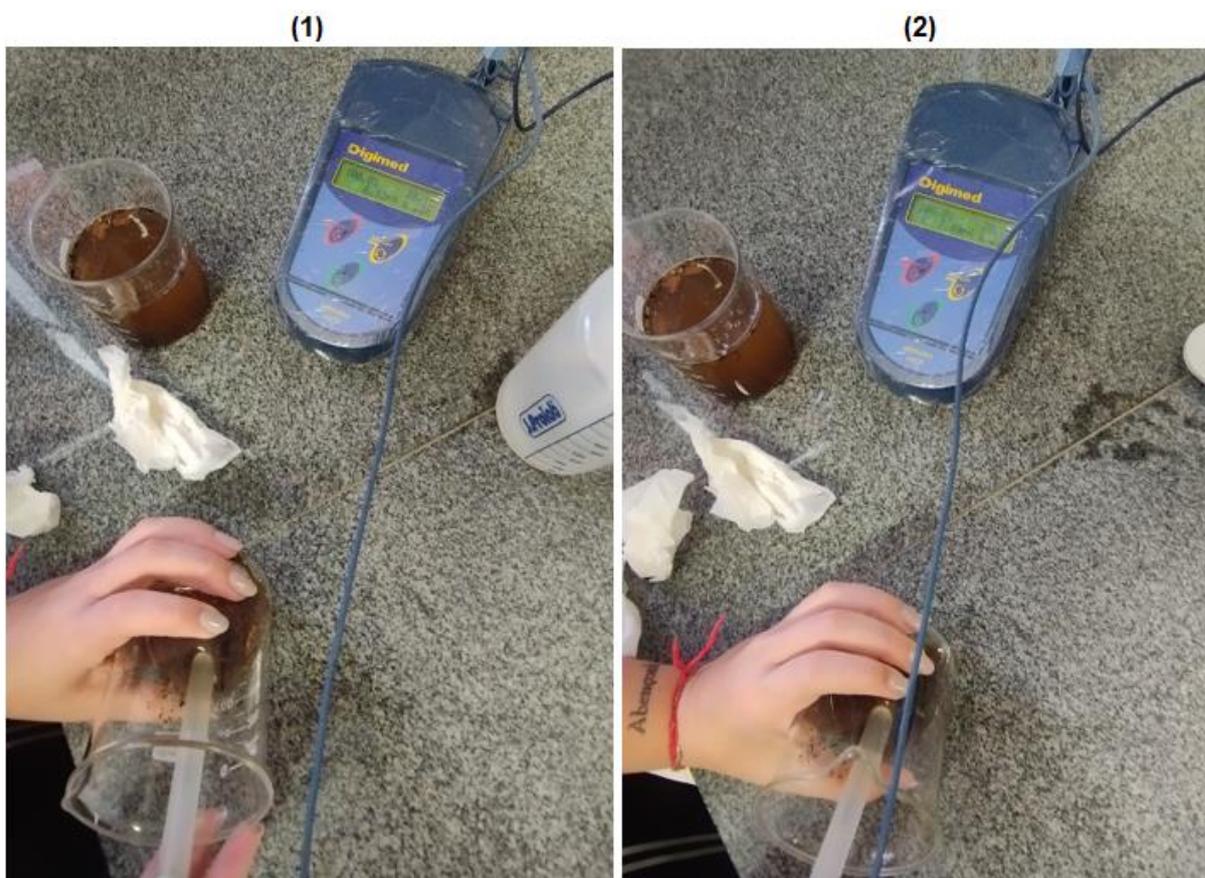


Fonte: Do autor.

A primeira análise, apresentada na Figura 63 (1), foi realizada na solução constituída pelo húmus da composteira com o sistema integrado, cujo resultado apresentou um pH aproximado de 6.92, indicando um composto próximo a neutralidade, ideal para utilização como adubo orgânico.

Já a segunda análise, ilustrada na Figura 63 (2), é constituída pelo húmus sem o sistema integrado, apresentou um pH aproximado de 7.43, indicando um índice ligeiramente alcalino, ficando acima da faixa ideal, que é em torno de 6 a 7.

Figura 63 - Resultados dos testes de pH em solução líquida.



Fonte: Do autor.

Outro aspecto importante a destacar é o consumo de energia durante a fase de testes, no qual foi empregado um algoritmo de contagem para monitorar a duração em que a resistência permaneceu ativada. Dessa forma, a Figura 64 apresenta o tempo de ativação da resistência elétrica, em minutos, ao longo dos 10 dias de monitoramento.

Figura 64 - Tempo total de ativação da resistência.

```
-----  
Temperatura: 30.62°C  
Umidade do solo: 52.42 %  
pH do solo: 7.03  
Tempo em que a resistencia ficou ligada: 205.0 minutos  
Aguardando 20 segundos para a próxima leitura  
-----
```

Fonte: Do autor.

Convertendo os valores de minutos para horas, temos um valor aproximado de 3,4167h. Utilizando a Equação 1 a seguir, podemos calcular o consumo de energia em kWh.

$$\text{Consumo de Energia (kWh)} = \frac{\text{Potência (W)} \times \text{Tempo(h)}}{1000} \quad (1)$$

$$\text{Consumo de Energia (kWh)} = \frac{600W \times 3,4167h}{1000} \quad (2)$$

$$\text{Consumo de Energia (kWh)} = 2,05kWh \quad (3)$$

Com o valor do consumo de energia em kWh, pode-se então calcular um custo médio empregando a equação 4 abaixo, onde foi utilizado uma tarifa atual com impostos de R\$0,89 por kWh.

$$\text{Custo} = \text{Consumo de Energia} \times \text{Custo por kWh} \quad (4)$$

$$\text{Custo} = 2,05kWh \times R\$ 0,89/kWh \quad (5)$$

$$\text{Custo} = R\$ 1,79 \quad (6)$$

5 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que a utilização de sensores e atuadores em um sistema de compostagem oferece vantagens e benefícios durante a maturação do composto orgânico. O acompanhamento do processo em tempo real facilita a tomada de decisões e favorece o andamento adequado, otimizando a decomposição orgânica e qualificando o húmus.

A plataforma ThingsBoard atendeu de maneira satisfatória à supervisão completa do processo, abrangendo alarmes, gráficos e *widgets* disponíveis, porém, foi empregada a versão *demo*, o que resultou em algumas limitações de tráfego. Entretanto, a ausência de supervisão desses parâmetros, levando-os a não estar na faixa ideal, pode resultar na necessidade de um tempo mais prolongado para atingir todas as fases da compostagem, e, conseqüentemente, trazer maiores riscos à qualidade do húmus.

Os dispositivos de monitoramento (sensores de temperatura, umidade e pH) apresentaram um índice de precisão consistente, onde foram empregadas técnicas de calibração adaptadas ao material a ser mensurado, garantindo a confiabilidade das leituras obtidas pelos sensores. Assim, pode-se destacar a eficiência do sensor de pH, que, ao ser comparado com a técnica da solução líquida, apresentou um valor muito próximo ao obtido na análise.

Os algoritmos de controle foram desenvolvidos para automatizar os níveis de temperatura e umidade. Observou-se que a resistência de aquecimento contribuiu de maneira satisfatória na criação de um ambiente propício para os microrganismos e na estabilização da temperatura, sem acarretar custos elevados de energia durante o processo. Por outro lado, o dispositivo designado para a aeração do sistema (*cooler*), não apresentou eficiência significativa ao diminuir a umidade gradativamente

enquanto os valores estavam acima de 70%. Como solução alternativa, considera-se a possibilidade de empregar um motor acoplado a um misturador, permitindo a agitação e revolvimento do material quando necessário.

O ajuste automático do pH apresentou uma dificuldade maior para ser implementado, pois envolve a necessidade de adição de materiais alcalinos ou ácidos, conforme a medição proporcionada pelo sensor. Devido a essa complexidade, os ajustes dos valores de pH foram realizados manualmente pelo usuário por meio dos alarmes condicionados pelo sistema.

A escolha da Raspberry Pi 3 atendeu às necessidades técnicas do sistema, principalmente no que se refere ao mecanismo de interação do usuário com o sistema, proporcionando uma solução acessível quando aplicada a composteiras maiores. Em contrapartida, como este projeto foi desenvolvido em uma composteira doméstica, ao replicá-lo em uma estrutura semelhante, pode-se considerar como uma solução alternativa a utilização de uma ESP32, que é capaz de atender de maneira satisfatória e com um custo reduzido.

Considerando que o sistema foi projetado para atender composteiras elétricas, seria vantajoso elaborar uma estrutura em aço inoxidável, proporcionando a estabilização térmica interna. Dessa forma, possibilitaria também a incorporação de dispositivos adicionais ao sistema, como um triturador posicionado na parte superior da estrutura, contribuindo na otimização do processo e garantindo que os resíduos estejam adequadamente preparados.

A principal contribuição deste trabalho para essa área foi a implementação de dispositivos de automação de custo reduzido, em comparação com os sistemas atualmente disponíveis no mercado, aplicados em uma composteira. Todos os procedimentos desse sistema demandam a presença de um responsável com habilidades técnicas para supervisionar e monitorar o processo, visto que envolve conhecimento especializado na área.

Portanto, pode-se concluir que este sistema de monitoramento e controle automatizado atinge os objetivos estabelecidos. No entanto, isso não isenta a necessidade de melhorias, tais como a implementação de dispositivos e mecanismos adicionais, controle dos parâmetros diretamente na plataforma e armazenamento em nuvem. Com o intuito de beneficiar a comunidade acadêmica, o Anexo 1 oferece o caminho de acesso aos códigos de programação desenvolvidos neste projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. **Resíduos Sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro, 71 p., 2004.

ADAMOWSKI, Júlio Cezar; FURUKAWA, Celso Massatoshi. **Mecatrônica: uma abordagem voltada à automação industrial**. Mecatrônica Atual, v. out./nov. 2001, n. 1, p. 8-11, 2001. Disponível em: <http://w3.ufsm.br/fuentes/index_arquivos/Meca.pdf>. Acesso em: 05 jun. 2023.

ANDRADE A., SOMA A., EIKI C. **Automação de baixo custo baseada no Raspberry Pi**. UFABC, 2016. DOI: 10.13140/RG.2.1.1282.3920. Acesso em: 05 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2021**. São Paulo, 2019. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2021/>>. Acesso em: 07 mai. 2023.

BACK, Max. **Sistema embarcado com RTOS: uma abordagem prática e voltada à portabilidade**. Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica Telemática, Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL), Palhoça, Santa Catarina, 2018. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/11214>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

BESEN, Gina Rizpah; RIBEIRO, Helena; GUNTHER, Wanda Maria Risso; JACOBI, Pedro Roberto. Coleta seletiva na Região Metropolitana de São Paulo: impactos da Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Revista Ambiente & Sociedade**, v. 17, n. 3, p. 259-278, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1414-753X2014000300015>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

BIOT, Francisco Mahedero. **Desarrollo de una aplicación IoT para el envío de imágenes mediante el protocolo MQTT**. 2020. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de València. Disponível em: <<https://riunet.upv.es/handle/10251/152408>>. Acesso em: 27 ago. 2023.

BOZZANO, João Francisco Schittenhelm. **Inventário do ciclo de vida de resíduos industriais classe II-A submetidos ao processo de compostagem por**

revolvimento de leiras. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/24516>>. Acesso em: 07 mai. 2023.

BRASIL. **Lei nº. 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 01 mai. 2023.

BRASIL. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa n. 61, de 08 de julho de 2020. **Diário Oficial da União**, 15 jul. 2020. Disponível em: www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?Data=30/12/2011&jornal=1&pagina=6&totalArquivos=160. Acesso em 20 mai. 2023.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Programa Nacional Lixão Zero.** Brasília, DF, 2019. 72 p. (Agenda Nacional de Qualidade Ambiental Urbana, 2). Disponível em: <<https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/agendaambientalurbana/lixao-zero/Programa-Lixao-Zero.pdf/@@download/file/Programa-Lixao-Zero.pdf>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

BRASIL. Secretaria de Governo. **ODM: Brasil cumpriu sete dos oito objetivos de desenvolvimento do milênio.** [Brasília]: Secretaria de Governo, 18 set. 2015. Disponível em: <<https://www.gov.br/secretariadegoverno/pt-br/portalfederativo/arquivos-privados/noticias/internacionais/brasil-cumpriu-sete-dos-oito-objetivos-de-desenvolvimento-do-milenio>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

BRIETZKE, Débora Tairini. **Avaliação do processo de compostagem considerando a relação carbono/nitrogênio.** 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade do Vale do Taquari - Univates, Lajeado, 14 dez. 2016. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10737/1398>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

DA CONCEIÇÃO, Wellington Nogueira Elizeu; DE RESENDE COSTA, Romualdo Monteiro. **Análise do Protocolo MQTT para Comunicação IoT através de um Cenário de Comunicação.** Caderno de Estudos em Sistemas de Informação, v. 5, n. 2, 2019. Disponível em: <<https://seer.uniacademia.edu.br/index.php/cesi/article/view/1688>>. Acesso em: 27 ago. 2023.

DRUMOND, Fernanda. 5 composteiras tecnológicas para criar adubo sustentável em casa. **Revista Casa e Jardim**, São Paulo, agosto de 2021. Disponível em <<https://revistacasaejardim.globo.com/Casa-e-Jardim/Sustentabilidade/noticia/2021/08/5-composteiras-tecnologicas-para-criar-adubo-sustentavel-em-casa.html>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

FRANCELIN, Lismara Polato; CORTEZ, Ana Tereza Cáceres. Compostagem: Por Uma Escola Mais Sustentável. **Ciência Geográfica**, XVIII, p. 116-130, 2014. Disponível em: <https://agbbauru.org.br/revista_xviii_1.html>. Acesso em: 07 mai. 2023.

FERNANDES, F., SILVA, S. M. C. P da. **Manual Prático para Compostagem de Biossólidos**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: ABES. 1999.

FRATTA, K. D.S. A.; TONELI, J. T. de C. L.; MARANA, K. B. B.; ANTONIO, G. C. **Revisão sistemática da situação da gestão de resíduos sólidos urbanos no Brasil, visando o seu aproveitamento energético**. IBEAS – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais. X Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Fortaleza/CE – 04 a 07/11/2019. Disponível em: <<https://www.ibeas.org.br/congresso10/>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

HECK, K.; MARCO, E. G. de; HAHN, A. B. B.; KLUGE, M.; SPILKI, F. R.; SAND, S. T. V. D. Temperatura de degradação de resíduos em processo de compostagem e qualidade microbiológica do composto final. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.54-59, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100008>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

HEINEN, Eduarth. **Raspiblocos: ambiente de programação didático baseado em Raspberry Pi e Blockly**. Monografia (Graduação) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Guarapuava, 2015. Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/11855>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD)**. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=298887>>. Acesso em: 07 mai. 2023.

JOÃO, Belmiro do Nascimento; SOUZA, Crisomar Lobo de; SERRALVO, Francisco Antonio. **Revisão sistemática de cidades inteligentes e internet das coisas como tópico de pesquisa**. Cadernos EBAPE.BR, v. 17, n. 4, pp. 1115–1130, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/1679-395174442x>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

KIEHL, Edmar José. **Manual de Compostagem: maturação e qualidade do composto**. 4. ed. São Paulo: E. J.Kiehl, 2004. 173p.

LAZZARETTI, Kellen; SEHNEM, Simone; BENCKE, Fernando Fantoni; MACHADO, Hilka Pelizza Vier. Cidades Inteligentes: Insights e Contribuições das Pesquisas Brasileiras. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, Chapecó -SC, v. 11, n. 1, p.1-16, jan. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.001.e20190118>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

LIMA, José Dantas de. **GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**. 01. ed. João Pessoa, Paraíba, 2001.

LOUREIRO, Mônica Michelotti; GREGORI, Isabel Christine Silva de. Como construir cidades sustentáveis? **Revista Eletrônica do Curso de Direito da UFSM**, v. 8, p. 458, 2013. Universidade Federal de Santa Maria. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5902/198136948348>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

LOUSADA, Ricardo. **Guia Completo do Sensor DS18B20 à Prova D'água**. Eletrogate, 2020. Disponível em: <<https://blog.eletrogate.com/guia-completo-sobre-sensor-de-temperatura-ds18b20-a-prova-dagua/>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

MARRIEL, Ivanildo Evódio; GAMA, Elto Eugênio Gomes e; SANTOS, Manoel Xavier dos; PACHECO, Cleso Antônio Patto; OLIVEIRA, Antônio Carlos de; FRANÇA, Gonçalo Evangelista de; VASCONCELLOS, Carlos Alberto. **Avaliação e seleção de genótipos de milho sob estresse de N no solo**. Sete Lagoas: EMBRAPA-CNPMS, 1998. 4 p. (EMBRAPA-CNPMS. Pesquisa em Andamento, 27). Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/479096>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

MARTINS, N. A. **Sistemas Microcontrolados: Uma abordagem com o Microcontrolador PIC 16F84**. São Paulo: Novatec, 2005.

MARTINS, Victor Ferreira. **Automação residencial usando protocolo MQTT, Node-RED e Mosquitto Broker com ESP32 e ESP8266**. 2019. 53 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia. 2020. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/28522>>. Acesso em: 18 dez. 2023.

MOURA, Rodrigo Costa de. **Potencial de Reuso de Traços em Arquiteturas ARM**. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – Programa de Pós-Graduação em Computação, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2015. Disponível em <https://www.guaica.ufpel.edu.br/bitstream/handle/prefix/8597/Dissertacao_Rodrigo_Costa_de_Moura.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

MOURALES, M. M.; XAVIER, C. A. M.; SILVA, A. A.; LUCAS JUNIOR, L. Uso da compostagem para tratamento de resíduo sólido de abatedouro de bovinos. **Revista Univap**, Vale do Paraíba, v. 13, n. 24, p. 136-137, 2006. Disponível em: <http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2006/epg/01/EPG00000379_ok.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2023.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**. 2015. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

NEIROTTI, Paolo. MARCO, Alberto de; CAGLIANO, Anna Corinna; MANGANO, Giulio; SCORRANO, Francesco. **Current trends in Smart City initiatives: Some stylised facts**. *Cities*, 38, 25-36, 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cities.2013.12.010>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

NOGUERA, Jorge Orlando Cuellar. Compostagem como Prática de Valorização dos Resíduos Alimentares com Foco Interdisciplinar na Educação Ambiental. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental REGET-CT/UFSM** (e-ISSN: 2236-1170), v (3), n. 3, p. 316 – 325, 2011. Disponível em: <<https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/3296>>. Acesso em: 7 jun. 2023.

OLIVEIRA, Glaci Elma Assunção. **Políticas públicas para o meio ambiente: Aplicação dos indicadores do desenvolvimento sustentável do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional) - Centro Universitário Alves Faria - UNIALFA, Goiânia, Goiás, 2016. Disponível em: <<http://tede.unialfa.com.br:8080/jspui/tede/handle/tede/25>>. Acesso em: 7 jun. 2023.

OLIVEIRA, Rogério Fernandes. **Composteira Eletrônica de Resíduos Orgânicos**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia da Computação, Centro Universitário Internacional Uninter, Castanhal, Paraná, 2022. Disponível em: <<https://repositorio.uninter.com/handle/1/1311>>. Acesso em: 28 mai. 2023.

OSSADA, J. C.; MARTINS, L. E. G. **Um estudo de campo sobre o estado da prática da elicitação de requisitos em sistemas embarcados**. WER10 - Workshop em Engenharia de Requisitos, p. 53–62, 2010.

PEDROSA, T. D.; FARIAS, C. A. S.; PEREIRA, R. A.; FARIAS, E. T. R. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 4448, out./dez. 2013. Disponível em: <<https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/issue/view/146>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

PEREIRA, Bruno Williams Antunes. **Sistema automático de irrigação autônomo de baixo custo**. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/18530>>. Acesso em: 27 out. 2023.

PEREIRA, Dionizio; SIMPLÍCIO, Eduardo; DONADI, Pedro. **Cidades Sustentáveis**. Pontifícia Universidade Católica de São Paulo – PUC/SP [Trabalho de especialização], p.1-55, 2019. Disponível em: <<https://www.pucsp.br/sites/default/files/download/bisus/bisus2019/Desafio16.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

PEREIRA, Fábio. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. 4ª ed. São Paulo: Érica, 2005.

PIRES, Adriano Borges. **Análise de viabilidade econômica de um sistema de compostagem acelerada para resíduos sólidos urbanos**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2011. Disponível em: <http://usuarios.upf.br/~engeamb/TCCs/2011-2/ADRIANO_PIRES_TCC_Corrigido_2022.pdf>. Acesso em: 28 mai. 2023.

PRÁ, M.; CORREA, E.; CORREA, L.; LOBO, M.; SPEROTTO, L.; MORES, E. **Compostagem como Alternativa para a Gestão Ambiental na Produção de Suínos**. Porto Alegre: Editora Evandraf Ltda, 2009. 144p.: il.

REIS, Danielle; FRIEDE, Reis; LOPES, Flávio Humberto Pascarelli. Política nacional de resíduos sólidos (Lei no 12.305/2010) e educação ambiental. **Revista Interdisciplinar do Direito** - Faculdade de Direito de Valença, v. 14, n. 1, p. 99–111, 2018. Disponível em: <<https://revistas.faa.edu.br/FDV/article/view/251>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

ROMEIRO, Ademar Ribeiro. **Desenvolvimento sustentável: uma perspectiva econômico-ecológica**. Estudos avançados, 26 (74), 65-92. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0103-40142012000100006>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SAMPAIO, Ítalo Cavalcante. **Sistema de monitoramento remoto de pacientes implementado em hardware de arquitetura arm**. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011. Disponível em <http://www.cgeti.ufc.br/monografias/%C3%8DTALO_CAVALCANTE_SAMPAIO.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2023.

SILVA, A. G., LEITE, V. D., SILVA, M. P. da; PRASAD, S., FEITOSA, W. B. Compostagem aeróbia conjugada de lodo de tanque séptico e resíduos sólidos vegetais. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 4, p. 371-379, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/n4w4Mbs56CT49GVhyJCscPK/?lang=pt#>>. Acesso em: 28 mai. 2023.

SILVA, Gilberlando Gomes da. **Compostagem orgânica no laboratório de Tecnologias Agroambientais UFCG-Campus I com foco nos objetivos do desenvolvimento sustentável**. Dissertação (Mestrado em Recursos Naturais), Programa de Pós Graduação em Recursos Naturais, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2022. Disponível em: <<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/28803>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SILVA, J. R. **Automação do processo de compostagem: uso de sensores para monitoramento e controle de parâmetros de um processo sustentável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2019. Disponível em: <<http://repositorio.ufcat.edu.br/tede/handle/tede/10118>>. Acesso em: 15 abr. 2023.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico temático do manejo de resíduos sólidos urbanos em 2021**. Brasília: Ministério das Cidades, 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/saneamento/snis/produtos-do-snis/diagnosticos/diagnosticos_snis>. Acesso em: 20 mai. 2023.

SIQUEIRA, Thais Menina Oliveira de; ASSAD, Maria Leonor Ribeiro Casimiro Lopes. **Compostagem de resíduos sólidos urbanos no Estado de São Paulo (Brasil)**. Ambiente & Sociedade, v. 18, n. 4, p. 243-264, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422ASOC1243V1842015>>. Acesso em: 28 mai. 2023.

SOUSA, Fábio et al. **IIOT Utilizando Protocolo MQTT**. UNA Pouso Alegre, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/bitstream/ANIMA/18962/1/IIOT%20UTILIZANDO%20PROTOCOLO%20MQTT.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2023

SOUZA, David José. **Desbravando o PIC: Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A**. 8ª ed. São Paulo, SP, Brasil: Érica, 2005.

TOCCI, Ronald J.; BARSALI, Juliano. **Microprocessadores e microcomputadores: hardware e software**. 3. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil, 1990.

TRASIX. **Composteiras Automáticas**. 2023. Disponível em: <<https://www.trasix.com.br>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

VALENTE, B. S.; XAVIER, E. G.; MORSELLI, T. B. G. A.; JAHNKE, D. S.; BRUM JR, B. S.; CABRERA, B. R.; MORAES, P. O.; LOPES, D. C. N. **Fatores que afetam o desenvolvimento da compostagem de resíduos orgânicos**. Archivos de Zootecnia, Córdoba, v. 58, n. 1, p. 9-85, 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.21071/az.v58i224.5074>>. Acesso em: 28 mai. 2023.

VIEIRA, Juliana de Souza Reis. Cidades Sustentáveis / Sustainable Cities. **Revista de Direito da Cidade**, v. 4, n. 2, p. 1-39, 2020. ISSN 2317-7721. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/rdc/article/view/9710>>. Acesso em: 01 mai. 2023.

WEISS, Marcos Cesar; BERNARDES, Roberto Carlos; CONSONI, Flavia Luciane. Cidades inteligentes como novas práticas para o gerenciamento dos serviços e infraestruturas urbanas: a experiência da cidade de Porto Alegre. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, 7(3), 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/2175-3369.007.003.AO01>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

ZAGO, Valéria Cristina Palmeira; BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade**. Eng. Sanit. Ambient., vol. 24, n. 2, p. 219-228, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S1413-41522019181376>>. Acesso em: 20 mai. 2023.

ZANELLA, Andrea; BUI, Nicola; CASTELLANI, Angelo; VANGELISTA, Lorenzo; ZORZI, Michele. **Internet of Things for Smart Cities**. IEEE Internet of Things Journal, v. 1, n. 1, p. 22-32, 2014. Disponível em <<https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

ZILLER, R.M. **Microprocessadores: Conceitos Importantes**. 2ª. Edição. Florianópolis: Edição do autor, 2000.

ZVEIBIL, V. Z. O Programa Lixão Zero: estratégias, limitações e desafios. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. **Revista de Administração Municipal**, edição 284: 15-24, dez. 2015. Disponível em: <<https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/biblio-913279>>. Acesso em: 05 jun. 2023.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Valores obtidos pelo sensor de pH no recipiente com terra e refrigerante de cola.



APÊNDICE B – Valores obtidos pelo sensor de pH no recipiente com serragem.



APÊNDICE C – Valores obtidos pelo sensor de pH no recipiente com terra e água sanitária.



ANEXOS

ANEXO A – Repositório no GitHub para acesso ao código e dados do sistema.

<https://github.com/JardelSeibel/jardelseibel>