

## 16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

### DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA IOT PARA O MONITORAMENTO E DIAGNÓSTICO DE PROCESSOS DE COMPOSTAGEM NO CONTEXTO DA AGENDA CLIMÁTICA

MARCELO A. G. GALLO<sup>1</sup>, MARCELO L. MURARI<sup>2</sup>, RODRIGO B. DELPHINO<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Bacharelado em Sistemas de Informação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Campus Votuporanga, marcelo.godoi@aluno.ifsp.edu.br

<sup>2</sup> Docente do IFSP, campus Votuporanga, murari@ifsp.edu.br

<sup>3</sup> Docente do IFSP, campus São Paulo, rodrigo.delphino@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 1.03.03.04-9 Sistemas de Informação

**RESUMO:** A compostagem é uma estratégia eficaz para a gestão de resíduos orgânicos, mas processos mal gerenciados podem se tornar anaeróbicos e emitir metano (CH<sub>4</sub>), um potente gás de efeito estufa. Em um momento em que o Brasil se prepara para sediar a COP30, a busca por soluções tecnológicas para a agenda climática se intensifica. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma plataforma IoT de baixo custo, projetada para atuar como uma ferramenta de diagnóstico para a qualidade de processos de compostagem. O sistema, baseado no microcontrolador ESP32 e no sensor de gás MQ-4, monitora as emissões para fornecer um feedback sobre a "saúde" da composteira. Nos testes iniciais, os níveis de CH<sub>4</sub> detectados foram consistentemente baixos, validando a eficiência aeróbica do processo e a capacidade do protótipo de funcionar como um indicador de qualidade. Conclui-se que a plataforma é uma solução viável e alinhada aos esforços de inovação para a mitigação das mudanças climáticas.

**PALAVRAS-CHAVE:** monitoramento ambiental; internet das coisas; gestão de resíduos; compostagem; COP30

### DEVELOPMENT OF AN IOT PLATFORM FOR MONITORING AND DIAGNOSIS OF COMPOSTING PROCESSES IN THE CONTEXT OF THE CLIMATE AGENDA

**ABSTRACT:** Composting is an effective strategy for organic waste management, but poorly managed processes can become anaerobic and emit methane (CH<sub>4</sub>), a potent greenhouse gas. As Brazil prepares to host COP30, the search for technological solutions for the climate agenda intensifies. This work presents the development of a low-cost IoT platform designed to act as a diagnostic tool for the quality of composting processes. The system, based on the ESP32 microcontroller and the MQ-4 gas sensor, monitors emissions to provide feedback on the composter's "health". In initial tests, detected CH<sub>4</sub> levels were consistently low, validating both the aerobic efficiency of the process and the prototype's ability to function as a quality indicator. It is concluded that the platform is a viable solution aligned with innovation efforts for climate change mitigation.

**KEYWORDS:** environmental monitoring; internet of things; waste management; composting; COP30

## INTRODUÇÃO

O aquecimento global, impulsionado pelas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), se tornou um dos desafios mais urgentes da atualidade (IPCC, 2023). No Brasil, essa discussão ganha urgência e oportunidade com a proximidade da COP30 em Belém, que intensifica a busca por soluções práticas e inovadoras para o cumprimento das metas climáticas estabelecidas pela nação. Neste contexto, a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU), que em 2023 somaram quase 81 milhões de toneladas no país (ABREMA, 2024), emerge como um campo estratégico para a ação e uma fonte relevante de emissões de metano (CH<sub>4</sub>).

A compostagem é uma estratégia para o tratamento de resíduos orgânicos (KIEHL, 1985). Contudo, seu benefício ambiental depende do manejo correto. Processos que se tornam anaeróbicos por falta de oxigênio ou excesso de umidade passam a emitir metano, um gás com alto potencial de aquecimento (ANGELO, 2016). Atualmente, o manuseio de composteiras depende do conhecimento empírico, carecendo de ferramentas acessíveis que forneçam um feedback em tempo real sobre a qualidade do processo.

Diante desta lacuna, o presente trabalho descreve o projeto e o teste inicial de uma plataforma de monitoramento baseada em Internet das Coisas (IoT), criada como um sistema de baixo custo para diagnosticar processos de compostagem, utilizando a detecção de metano como principal indicador de eficiência e segurança ambiental.

## MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia baseia-se no desenvolvimento de uma plataforma tecnológica modular e na sua validação funcional como prova de conceito.

### Arquitetura da Plataforma de Monitoramento

O sistema foi projetado com foco em baixo custo, modularidade e facilidade de uso.

**Hardware:** O núcleo do protótipo é uma placa de desenvolvimento DevKit V1, equipada com o microcontrolador ESP32-WROOM-32. Esta plataforma foi selecionada por sua conectividade Wi-Fi integrada, capacidade de processamento e facilidade de prototipagem (MAIER et al., 2017). A ela foi acoplado um sensor de gás modelo MQ-4 para a detecção de metano (RAHMA et al., 2024).

Na tabela 1, apresentam-se os valores dos componentes com a loja de referência para o mês de agosto de 2024:

TABELA 1. Relação de preços do protótipo.

|                         | Valor    | Loja      |
|-------------------------|----------|-----------|
| ESP32                   | R\$46,45 | Makerhero |
| Sensor MQ-4             | R\$13,20 | Robocore  |
| Protoboard 400 pontos   | R\$6,55  | Robocore  |
| Pacote de cabos jumpers | R\$27,00 | Makerhero |
| TOTAL:                  | R\$93,20 |           |

Fonte: Do autor, 2025.

**Software (Firmware):** O firmware foi desenvolvido em C++ na Arduino IDE para realizar leituras periódicas e transmitir os dados.

**Aplicação Web:** Uma interface web foi desenvolvida utilizando o framework PHP Laravel. O ambiente de desenvolvimento e a implantação foram gerenciados com a ferramenta Sail, que utiliza contêineres Docker, garantindo a portabilidade e a consistência do ambiente. A aplicação está hospedada localmente em um servidor doméstico.

### Validação Funcional e Teste Inicial:

A validação da plataforma foi realizada em duas etapas: testes de estabilidade e calibração, seguidos por um teste de campo inicial em uma composteira doméstica ativa para verificar o comportamento do sistema em um cenário de uso real.

### Calibração do Sensor e Processamento dos Dados

Para traduzir a leitura analógica (de tensão) do sensor MQ-4 em uma estimativa de concentração de metano (ppm), o primeiro passo foi identificar sua resistência em ar limpo (R<sub>0</sub>). Para isso, o sensor

foi mantido em operação durante a realização de 100 leituras em um ambiente externo e arejado, considerado como condição ideal do ar, utilizando um firmware dedicado (01\_calibration.ino). O valor de R0 foi então calculado aplicando-se a Equação 1 sobre a média das leituras analógicas (224.78), resultando em  $R0 = 86.09 \Omega$ , no detalhe:

$$R0 = \frac{4095 * RL}{LeituraAnalógicaMédia} - RL \quad (1)$$

em que,

R0 - resistência em ar limpo

4095 - resolução de 12 bits do Conversor Analógico-Digital (ADC) do microcontrolador ESP32

LeituraAnalógicaMédia - Valor digital lido pelo microcontrolador

RL - resistência de carga (5.0 kΩ)

A conversão do sinal analógico bruto lido pelo microcontrolador em uma concentração de gás (PPM) é realizada pelo firmware principal do ESP32 (01\_main\_firmware.ino), que é projetado para garantir a autonomia do dispositivo, sendo necessário apenas plugar o circuito à uma fonte de energia 5V. O processo é executado em uma sequência de três etapas. Primeiramente, a função lerResistenciaSensor() converte a leitura digital do ADC para o valor de resistência do sensor (Rs). Em seguida, calcula-se a razão normalizada entre a resistência medida e a resistência em ar limpo (Rs/R0), que funciona como o principal indicador da variação de gás no ambiente. Por fim, na função calcularPPM(), essa razão é inserida na Equação 2, uma fórmula logarítmica derivada da curva de sensibilidade do fabricante, para se obter a concentração final em PPM, no detalhe:

$$PPM = 10\left(\frac{\log_{10}\left(\frac{RS}{R0}\right) - 0.36}{-0.38}\right) \quad (2)$$

em que,

-0.38 representa o Slope baseado no fabricante

-0.36 representa a Interseção baseado no fabricante

Esta abordagem embarcada permite que o dispositivo transmita dados já processados e de valor significativo para a plataforma web, otimizando a comunicação e o armazenamento.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do monitoramento contínuo por duas semanas confirmaram a viabilidade da plataforma como ferramenta de diagnóstico e validaram a eficiência aeróbica da composteira. A concentração de metano manteve-se predominantemente na faixa de 12.25 a 20.38 ppm, com uma média de 13 ppm, valores consistentes com a linha de base do sensor em ar limpo. Picos esporádicos, que atingiram aproximadamente 28 ppm, foram registrados, possivelmente associados a eventos de manejo, como o revolvimento do material orgânico, mas não indicaram uma transição para um estado anaeróbico contínuo.

Adicionalmente, um evento não controlado ao final do experimento revelou um resultado metodológico crucial. A proximidade de um automóvel a gasolina levou à contaminação do sensor, que passou a registrar leituras anômalas na faixa de 300-400 ppm. Este fato, embora tenha interrompido o monitoramento da compostagem, serviu como validação prática de uma limitação importante do sensor MQ-4: sua sensibilidade cruzada a outros hidrocarbonetos. Isso evidencia a necessidade de considerar o ambiente de instalação para a confiabilidade dos dados e reforça a função da plataforma como uma ferramenta de diagnóstico, e não de medição absoluta, para o público-alvo.

A discussão feita sobre a arquitetura a ser utilizada revelou a flexibilidade da plataforma escolhida. Embora o protótipo utilize um ESP32 para análise via Wi-Fi, o conceito permite adaptações para diferentes contextos. Por exemplo, em cenários sem conectividade à internet, o sistema poderia ser adaptado para feedback visual local (via LEDs ou buzzers). Para aplicações em áreas rurais ou remotas, a plataforma poderia ser expandida com módulos de comunicação celular, como o SIM7000G, que integra tecnologias GPRS, NB-IoT e LTE-M, ou mesmo com tecnologias de longo alcance como LoRaWAN. Isso posiciona o trabalho não como um produto, mas como um conceito adaptável a múltiplos cenários de conectividade.

No detalhe, a ideia consistiu em utilizar uma plataforma disseminada como de baixo custo e de código/arquitetura aberta como apoio para indivíduos que não possuem tanta familiaridade com

técnicas essencialmente práticas que demandam certa experiência e vivência, tornando a adoção menos frustrante e impactando de forma positiva no cenário climático.

Nota-se que a escolha das tecnologias para o painel web foram escolhidas fundamentalmente baseadas na experiência do autor, não invalidando a adoção de plataformas no-code, dentre outras possibilidades.

## CONCLUSÕES

Chegamos a conclusão que este trabalho demonstrou com sucesso não somente a experiência de projeto e validação de uma plataforma IoT de baixo custo para o diagnóstico de processos de compostagem, como também evidenciou uma visão benéfica para processos essencialmente manuais e de difícil feedback. O protótipo se mostrou eficaz para monitorar a "saúde" de uma composteira, utilizando a "não detecção" de metano como um indicador positivo de um processo de compostagem bem manuseado e a identificação de picos de emissão como indicador para a necessidade de adequação no manuseio. A contribuição principal é a entrega de uma visão focada no usuário final e sem experiência, mas que deseja contribuir para a causa da gestão de resíduos, somado a uma ferramenta de gestão que auxilia a manter seu sistema de compostagem em ótimo estado, evitando emissões acidentais.

Como trabalhos futuros, planeja-se a validação da plataforma em múltiplos cenários, como composteiras comunitárias, e a evolução do protótipo com a integração de sensores de temperatura e umidade para implementar um modelo de calibração dinâmico, aumentando a acurácia das medições. Adicionalmente, a exploração de módulos de comunicação de longo alcance, como LoRaWAN, é vislumbrada para viabilizar aplicações em zonas rurais, ampliando o impacto do projeto.

Em um momento em que o Brasil se prepara para sediar a COP30, o desenvolvimento de um conceito de operação e monitoramento como este busca contribuir de maneira prática e alinhada aos esforços nacionais de inovação para uma economia de baixo carbono, bem como fomentar técnicas sustentáveis para a população.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

M.A.G.G. foi responsável pela conceitualização da pesquisa, desenvolvimento do hardware e software, execução dos testes e redação do manuscrito. M.L.M. contribuiu com a supervisão geral, orientação metodológica e revisão crítica do trabalho. R.B.D. atuou na articulação da colaboração inter-campi e na revisão do planejamento experimental. Todos os autores leram e aprovaram a versão final submetida.

## AGRADECIMENTOS

O autor agradece ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Campus Votuporanga, pela infraestrutura e suporte institucional. Estendo minha gratidão ao Prof. Dr. Marcelo Luis Murari, pela orientação fundamental e incentivo contínuo em todas as fases do projeto, e ao Prof. Dr. Rodrigo de Benedictis Delphino e ao grupo de pesquisa Projeto Sustentare (IFSP - Campus São Paulo), pela valiosa colaboração que enriqueceu esta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. São Paulo: ABREMA, 2020.

ANGELO, A. Gás metano dispara e ameaça meta de 2 graus. **oeco.org.br**, 2016.

BARREIRA, A.; ANGELO, A.; POTENZA, P. Brasil precisa cortar emissões em 92% até 2035. **Observatório do Clima**, 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Fourth Assessment Report**. Geneva: IPCC, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Geneva: IPCC, 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023**. Geneva: IPCC, 2023.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: Agronômica Ceres, 1985.

MAIER, M. et al. Comparative analysis and practical implementation of the ESP32 microcontroller module for the internet of things. In: 2017 **IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)**, 2017.

MALAFAIA, G. et al. Vermicompostagem de lodo de curtume em associação com esterco bovino utilizando Eisenia foetida. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 4, p. 1-6, 2015.

OLIVEIRA, J. **Livro Internet das Coisas**. 2. ed. São Paulo: Novatec, 2021.

RAHMA, M. et al. Methane (CH<sub>4</sub>) Detection System Using The TGS2611 Sensor and MQ-4 Sensor. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2780, n. 1, 2024.

SILVA, R. **Avaliação do potencial da compostagem de digestato da digestão anaeróbia seca de resíduo alimentar**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

TSAI, P. et al. **Proposta do Observatório do Clima para a Segunda Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC) do Brasil no âmbito do Acordo de Paris (2030-2035)**. Observatório do Clima, 2024.