Artigo Completo

Sistema de Monitoramento e Alerta de Temperatura para Compostagem na Agricultura Regenerativa: Integração IoT, Análise de Dados e Automação Operacional

Temperature Monitoring and Alert System for Composting in Regenerative Agriculture: IoT Integration, Data Analysis, and Operational Automation

Maria Clara Mendes da Silva [Universidade Federal do Vale do São Francisco | *clara.mendes@discente.univasf.edu.br*]
Ana Júlia Fernandes de Oliveira Barros [Universidade Federal do Vale do São Francisco | *anajulia.oliveira@univasf.edu.br*]
Danillo de Lima Alves Xavier [Universidade Federal do Vale do São Francisco | *danillox5@hotmail.com*]
Rodrigo Fernandes Scocca [Universidade Federal do Vale do São Francisco | *rodrigoscocca@hotmail.com*]
Jadsonlee da Silva Sá [Universidade Federal do Vale do São Francisco | *jadsonlee.sa@univasf.edu.br*]

Universidade Federal do Vale do São Francisco, Avenida Antônio Carlos Magalhães, 510, Bairro Santo Antônio, Juazeiro, Bahia, 48902-300, Brasil.

Resumo. A compostagem é um processo biológico aeróbio influenciado por variáveis como temperatura, umidade, oxigenação e relação carbono/nitrogênio. Entre esses parâmetros, a temperatura se destaca como um indicador operacional relevante, pois reflete a atividade microbiana e permite acompanhar a transição entre as fases mesofílica, termofílica e de maturação. Este trabalho apresenta a estruturação e validação de uma arquitetura computacional para monitoramento e alerta de temperatura em leiras de compostagem no contexto da agricultura regenerativa, utilizando dados reais coletados no pátio de compostagem da unidade da Bayer em Petrolina-PE. A solução integra sensores Laird conectados via LoRaWAN, transmissão por *gateway*, armazenamento em BigQuery, visualização em Power BI e automação de alertas por meio do Fabric Activator e Microsoft Teams. O conjunto de dados analisado compreendeu 100 dias de monitoramento, sendo submetido a etapas de filtragem, organização, verificação de consistência temporal, avaliação de volumetria e análise descritiva. Os resultados permitiram caracterizar padrões térmicos das leiras, identificar comportamentos associados a diferentes fases do processo e estruturar indicadores visuais para acompanhamento operacional. Além disso, foram configuradas regras de alerta para notificar a entrada das leiras na faixa termofílica e realizar o acompanhamento recorrente enquanto essa condição térmica permanece ativa. A principal contribuição do trabalho está na demonstração de como uma infraestrutura IoT já implantada pode ser organizada e integrada a ferramentas analíticas e de automação para transformar medições contínuas de campo em informações úteis à tomada de decisão operacional. Embora o sistema utilize a temperatura como variável central e não substitua medições complementares de umidade, oxigenação ou composição química, os resultados indicam seu potencial para apoiar o monitoramento contínuo, reduzir a dependência de inspeções manuais e fortalecer práticas de gestão associadas à agricultura regenerativa.

Abstract. Composting is an aerobic biological process influenced by variables such as temperature, moisture, oxygen availability, and carbon-to-nitrogen ratio. Among these parameters, temperature stands out as a relevant operational indicator because it reflects microbial activity and supports the monitoring of transitions between the mesophilic, thermophilic, and maturation phases. This work presents the structuring and validation of a computational architecture for temperature monitoring and alerting in composting windrows within the context of regenerative agriculture, using real data collected at the composting yard of Bayer's unit in Petrolina-PE, Brazil. The proposed solution integrates Laird sensors connected through LoRaWAN, gateway-based data transmission, storage in BigQuery, visualization in Power BI, and alert automation using Fabric Activator and Microsoft Teams. The analyzed dataset covered 100 days of monitoring and was processed through filtering, organization, temporal consistency verification, volumetry assessment, and descriptive analysis. The results enabled the characterization of thermal patterns in the windrows, the identification of behaviors associated with different composting phases, and the development of visual indicators for operational monitoring. In addition, alert rules were configured to notify users when windrows entered the thermophilic range and to provide recurring updates while this thermal condition remained active. The main contribution of this work lies in demonstrating how an existing IoT infrastructure can be organized and integrated with analytical and automation tools to transform continuous field measurements into useful information for operational decision-making. Although the system uses temperature as its central variable and does not replace complementary measurements of moisture, oxygen availability, or chemical composition, the results indicate its potential to support continuous monitoring, reduce dependence on manual inspections, and strengthen management practices associated with regenerative agriculture.

Palavras-chave: Compostagem. Monitoramento de temperatura. IoT. LoRaWAN. Automação de alertas. Agricultura regenerativa.

Keywords: Composting. Temperature monitoring. IoT. LoRaWAN. Alert automation. Regenerative agriculture.

Recebido/Received: 31 03 2026 • **Aceito/Accepted:** 25 08 2026 • **Publicado/Published:** 15 10 2026

Publicado sob a Licença Pública Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 (CC BY 4.0)

1 Introdução

A agricultura regenerativa tem se consolidado como uma abordagem estratégica para a sustentabilidade agrícola, ao integrar produtividade, conservação dos recursos naturais, restauração da saúde do solo e redução de impactos ambientais. Segundo Lacanne and Lundgren [2018], esse modelo busca aliar práticas produtivas rentáveis à conservação dos recursos naturais. Schreefel *et al*. [2020] destacam que a regeneração contínua do solo, o aumento da biodiversidade e a ciclagem de nutrientes são pilares centrais dessa abordagem, tornando-a relevante diante das pressões climáticas, da necessidade de redução de resíduos e da busca por sistemas agrícolas mais resilientes.

Nesse contexto, a compostagem ocupa papel essencial ao transformar resíduos orgânicos em um composto estável e nutritivo, contribuindo para o fechamento do ciclo de nutrientes no solo e para a redução do descarte inadequado de biomassa. Albino *et al*. [2021] apontam que a compostagem contribui para a melhoria da estrutura e da fertilidade do solo, além de mitigar passivos ambientais associados ao acúmulo de resíduos orgânicos. A eficiência desse processo, entretanto, depende do equilíbrio de variáveis críticas, como temperatura, umidade, oxigenação e relação carbono/nitrogênio (C/N). Entre essas variáveis, a temperatura se destaca como um indicador operacional relevante, pois reflete a atividade microbiana, permite acompanhar a transição entre as fases mesofílica, termofílica e de maturação, e auxilia na identificação de possíveis desvios no processo.

A fase termofílica, em particular, é fundamental para a degradação de compostos orgânicos mais complexos e para a higienização do material, pois temperaturas adequadas contribuem para a redução de patógenos e sementes indesejadas. Por outro lado, quedas abruptas de temperatura podem indicar redução da atividade microbiológica, enquanto temperaturas excessivamente elevadas podem comprometer o equilíbrio biológico do processo. Dessa forma, o monitoramento contínuo da temperatura não substitui análises complementares de umidade, oxigenação ou composição química, mas fornece uma referência operacional importante para apoiar decisões como inspeção da leira, revolvimento, irrigação ou verificação de anomalias térmicas.

A adoção de tecnologias digitais tem ampliado significativamente o potencial de monitoramento e otimização da compostagem. Soluções baseadas em *Internet of Things* (IoT) permitem a coleta contínua e remota de dados de campo, reduzindo a dependência de medições manuais e aumentando a rastreabilidade do processo. Em ambientes agrícolas distribuídos, tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo, como LoRaWAN, possibilitam conectar sensores instalados em locais afastados a sistemas de armazenamento, processamento e visualização de dados. Quando integradas a plataformas analíticas e mecanismos de automação, essas tecnologias permitem transformar leituras brutas em indicadores visuais e alertas capazes de orientar ações operacionais.

A unidade da Bayer em Petrolina-PE implantou, em 2022, um pátio de compostagem, ilustrado na Figura 1, composto por leiras destinadas ao processamento de resíduos provenientes do cultivo protegido, jardinagem e refeitório. Nesse ambiente, sensores Laird instalados nas leiras realizam medições de temperatura e transmitem os dados por meio de uma infraestrutura baseada em comunicação LoRaWAN. Apesar da existência dessa infraestrutura de coleta, havia a necessidade de organizar, validar e estruturar o uso computacional dos dados, de modo a facilitar sua interpretação, ampliar a rastreabilidade e apoiar a tomada de decisão operacional. A ausência de uma camada integrada de análise, visualização e alerta limitava o aproveitamento dos dados coletados continuamente em campo.

Diante desse cenário, este trabalho apresenta a estruturação e validação de uma arquitetura computacional para monitoramento e alerta de temperatura em leiras de compostagem, utilizando a infraestrutura já existente na unidade da Bayer em Petrolina-PE. A solução integra sensores Laird conectados via LoRaWAN, transmissão por *gateway*, armazenamento dos dados em BigQuery, visualização em Power BI e automação de alertas por meio do Fabric Activator e Microsoft Teams. Assim, a infraestrutura física de sensoriamento e comunicação previamente implantada é complementada por uma camada computacional voltada à organização, análise, visualização e reação a eventos térmicos.

A principal contribuição deste trabalho está na validação e estruturação de um fluxo computacional aplicado ao monitoramento térmico de leiras de compostagem em ambiente operacional real. Diferentemente de abordagens baseadas apenas em protótipos laboratoriais, o estudo demonstra como uma infraestrutura IoT já implantada pode ser integrada a ferramentas analíticas e de automação para transformar medições contínuas de campo em informações úteis ao acompanhamento do processo. Nesse sentido, a contribuição é caracterizada como uma aplicação de Engenharia da Computação voltada à integração de sistemas IoT, pipeline de dados, análise descritiva e automação baseada em eventos, com aderência a problemas reais de monitoramento no setor agroindustrial.

Este trabalho não propõe um novo algoritmo de controle nem um novo modelo de predição, mas valida uma arquitetura aplicada capaz de apoiar o monitoramento contínuo da compostagem e reduzir a dependência de inspeções exclusivamente manuais. Como resultado, busca-se fornecer uma base computacional para acompanhamento térmico, emissão de alertas, análise histórica e futura evolução para estratégias mais avançadas, como incorporação de sensores adicionais, avaliação de falhas de comunicação, análise de latência, segurança da informação e modelos preditivos para apoio à tomada de decisão.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta a fundamentação teórica e os trabalhos relacionados, abordando compostagem, parâmetros críticos, IoT e sistemas de monitoramento; a Seção 3 descreve a metodologia, a arquitetura computacional, a aquisição e o pré-processamento dos dados; a Seção 4 apresenta os resultados e a discussão, incluindo a análise térmica, o dashboard e a automação de alertas; por fim, a Seção 5 apresenta as conclusões, limitações e perspectivas futuras.

2 Fundamentação Teórica e Trabalhos Relacionados

A otimização do processo de compostagem em um contexto de agricultura regenerativa exige o acompanhamento de pa-



Figura 1. Fotografia do setor de compostagem na Bayer Petrolina.

râmetros capazes de indicar a eficiência microbiológica, a estabilidade do processo e a qualidade potencial do composto final. Nesta seção são apresentados os fundamentos da compostagem, seus estágios e variáveis críticas, com ênfase na temperatura como indicador operacional. Em seguida, são discutidos sistemas de monitoramento baseados em *Internet of Things* (IoT), a pilha de comunicação utilizada em aplicações distribuídas e o papel de ferramentas de visualização e automação. Por fim, são apresentados trabalhos relacionados e uma comparação com a abordagem adotada neste estudo.

2.1 Compostagem e Parâmetros Críticos

A compostagem é um processo biotecnológico de decomposição aeróbia da matéria orgânica, conduzido por microrganismos sob condições controladas de temperatura, umidade, oxigenação e relação carbono/nitrogênio (C/N). A gestão adequada desses fatores acelera a decomposição da matéria orgânica, reduz o descarte de resíduos em aterros e contribui para a produção de um composto mais estável e rico em nutrientes [Prieto, 2019; Farooq *et al*., 2022].

O processo ocorre, de modo geral, em fases sucessivas associadas à atividade microbiológica e à variação térmica da massa compostada. Inicialmente, a fase mesofílica é caracterizada por temperaturas moderadas e intensa atividade de microrganismos adaptados a essa faixa. Em seguida, a fase termofílica apresenta elevação da temperatura, geralmente entre 45 °C e 65 °C, faixa importante para a degradação de compostos orgânicos mais complexos e para a redução de patógenos e sementes indesejadas [Singh and Kulshreshtha, 2021; Rashid *et al*., 2021]. Posteriormente, ocorre a fase de resfriamento, seguida pela maturação do composto. A Tabela 1 resume as faixas de temperatura e os intervalos típicos de tempo associados às principais fases do processo.

Embora a temperatura seja a variável central analisada neste trabalho, ela está diretamente relacionada a outros parâmetros críticos da compostagem. A umidade influencia a atividade microbiana e, consequentemente, a geração de calor: valores muito baixos reduzem a decomposição, enquanto o excesso de umidade pode limitar a difusão de oxigênio e favorecer condições anaeróbias. A oxigenação, por sua vez, sustenta a respiração aeróbia dos microrganismos, sendo essencial para a manutenção da fase termofílica. A relação C/N afeta a disponibilidade de carbono como fonte de energia e de nitrogênio para o crescimento microbiano, influenciando a intensidade e a duração das fases do processo [Brietzke, 2017; Pedrosa *et al*., 2015].

Tabela 1. Estágios do processo de compostagem e faixas de controle.

Estágio	Faixa de temperatura	Faixa de tempo
Fase mesofílica	Até 40 °C	2 a 5 dias
Fase termofílica	Entre 45 °C e 65 °C	3 a 5 semanas
Fase de resfriamento	De 40 °C até a temperatura ambiente	1 a 2 meses

Fonte: Adaptado de EMBRAPA [2024].

Dessa forma, variações térmicas podem indicar indiretamente alterações na umidade, na aeração ou na atividade biológica da leira. Quedas abruptas de temperatura podem estar associadas à redução da atividade microbiológica, à baixa umidade, à compactação do material ou à deficiência de oxigenação. Temperaturas excessivamente elevadas, por outro lado, podem indicar desequilíbrios que comprometem a eficiência biológica do processo. Assim, neste trabalho, a temperatura é tratada como um indicador operacional central para o monitoramento da compostagem, mas não como critério único para avaliação completa da qualidade do composto.

2.2 Sistemas de Monitoramento Baseados em IoT

Soluções baseadas em *Internet of Things* têm ganhado espaço na agricultura por possibilitarem a coleta contínua e remota de dados ambientais com baixo consumo energético e maior rastreabilidade. Sensores embarcados, conectados a redes de comunicação de longo alcance, permitem monitorar variáveis como temperatura, umidade e gases associados ao processo

de decomposição, reduzindo a dependência de inspeções manuais e ampliando a capacidade de resposta operacional.

Rodrigues *et al*. [2021] demonstram a aplicação de microcontroladores como ESP32 em composteiras automatizadas, validando a viabilidade de sistemas de baixo custo para controle de temperatura e umidade. Entretanto, em cenários industriais ou agrícolas distribuídos, a adoção de tecnologias de maior alcance e baixo consumo torna-se especialmente relevante. Nesse contexto, o protocolo LoRaWAN é amplamente utilizado em aplicações IoT por permitir comunicação sem fio de longo alcance, baixo consumo energético e operação em ambientes com sensores geograficamente distribuídos.

Além da camada de comunicação sem fio, sistemas IoT aplicados ao monitoramento ambiental normalmente dependem de mecanismos de mensageria, processamento, armazenamento e visualização. Protocolos leves, como MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), são frequentemente utilizados para transmissão de mensagens em arquiteturas distribuídas, pois seguem um modelo de publicação/assinatura adequado a dispositivos com restrições de processamento, energia e largura de banda [iso, 2016]. Após a transmissão, os dados podem ser estruturados por aplicações intermediárias, armazenados em bancos analíticos e disponibilizados para painéis de visualização e sistemas de alerta.

2.3 Pilha de Comunicação e Integração de Dados

Em sistemas distribuídos de monitoramento, a organização da pilha de comunicação é essencial para garantir rastreabilidade, manutenção e evolução da solução. No contexto deste trabalho, a arquitetura analisada pode ser compreendida como um fluxo em camadas, iniciando na medição física da temperatura e finalizando na visualização e automação de alertas. A Tabela 2 apresenta uma visão resumida dessa pilha.

Essa organização em camadas evidencia a natureza computacional do sistema, uma vez que o monitoramento não depende apenas da presença de sensores, mas da integração entre dispositivos físicos, protocolos de comunicação, serviços de armazenamento, ferramentas analíticas e mecanismos de reação a eventos.

2.4 Visualização Dinâmica e Sistemas de Alerta

O uso de ferramentas de *Business Intelligence* (BI), como Power BI, Grafana e Kibana, permite a criação de painéis dinâmicos para acompanhamento de séries temporais e indicadores operacionais. Esses ambientes facilitam a interpretação de grandes volumes de dados, permitindo que usuários identifiquem tendências, anomalias e condições críticas de forma mais rápida do que por inspeção direta de tabelas ou registros brutos. Almeida *et al*. [2021] destacam que dashboards interativos contribuem para o acompanhamento de indicadores e para o suporte à tomada de decisão em ambientes operacionais.

No caso da compostagem, a visualização dinâmica permite acompanhar a evolução da temperatura das leiras ao longo do tempo, identificar permanência na faixa termofílica e observar quedas ou picos térmicos que possam indicar necessidade de intervenção. Quando associada a sistemas de automação, essa visualização pode ser complementada por alertas baseados em regras, acionados quando determinados limites são ultrapassados.

Ferramentas como o Fabric Activator permitem configurar eventos associados a dados monitorados em plataformas analíticas, possibilitando o envio de notificações automáticas quando uma condição definida é satisfeita. No contexto deste trabalho, essa automação é utilizada para notificar o atingimento de condições térmicas de interesse e acompanhar a permanência das leiras em faixas consideradas relevantes para o processo. Assim, a integração entre visualização e alerta transforma o sistema de monitoramento em um mecanismo de apoio à decisão operacional.

2.5 Trabalhos Relacionados

Pesquisas recentes demonstram o potencial da integração entre sensores IoT e compostagem. Haque *et al*. [2019] implementaram um sistema automatizado para monitoramento de variáveis ambientais em aplicações agrícolas utilizando sensores e comunicação sem fio, evidenciando ganhos associados à automação e ao acompanhamento remoto. Rodrigues *et al*. [2021] desenvolveram uma composteira automatizada baseada em ESP32, com foco no controle de temperatura e umidade em uma solução de baixo custo. Seibel [2023] apresentou uma solução de monitoramento e controle de compostagem baseada em IoT, destacando o uso de sensores e sistemas embarcados para reduzir a dependência de interferência manual.

Apesar da relevância dessas abordagens, muitos trabalhos concentram-se em protótipos locais ou em sistemas desenvolvidos especificamente para validação experimental. Ainda há espaço para estudos que discutam a utilização de infraestruturas já existentes em ambientes operacionais reais, especialmente quando o foco está na organização dos dados, na validação da continuidade das medições, na integração com plataformas corporativas e na automação de alertas. A Tabela 3 apresenta uma comparação entre trabalhos relacionados e a abordagem adotada neste estudo.

A comparação evidencia que a principal contribuição deste estudo não está na proposição de um novo sensor, algoritmo ou protocolo, mas na estruturação e validação de uma arquitetura computacional aplicada em ambiente operacional real. No caso analisado, a infraestrutura física de sensoriamento e transmissão já estava implantada. Assim, o foco deste trabalho está na organização do fluxo de dados, na validação da consistência dos registros, na análise descritiva das séries temporais, no desenvolvimento de visualizações em Power BI e na automação de alertas por meio do Fabric Activator e Microsoft Teams.

3 Metodologia: Arquitetura e Validação Computacional

Este trabalho adota uma abordagem aplicada, quantitativa e exploratória no campo da Engenharia da Computação, com foco na validação e estruturação computacional de um sistema de monitoramento térmico para leiras de compostagem. A pesquisa foi conduzida a partir de dados reais coletados no pátio de compostagem da unidade da Bayer em Petrolina-PE, utilizando uma infraestrutura de sensoriamento e comunicação previamente implantada. Assim, o estudo não propõe uma

Tabela 2. Pilha de comunicação e integração de dados utilizada no sistema.

Camada	Tecnologia	Função
Sensoriamento	Sensores Laird	Medição da temperatura nas leiras.
Comunicação IoT	LoRaWAN	Transmissão de longo alcance e baixo consumo energético.
Borda	Gateway LoRaWAN	Recepção e encaminhamento dos pacotes de dados.
Mensageria	MQTT	Transporte das mensagens pelo modelo publicação/assinatura.
Processamento	Middleware em Python	Estruturação e preparação dos registros coletados.
Armazenamento	BigQuery	Persistência e consulta analítica dos dados.
Visualização	Power BI	Construção de painéis e indicadores operacionais.
Automação	Fabric Activator/Teams	Geração e envio de alertas aos responsáveis.

Tabela 3. Comparação entre trabalhos relacionados e a abordagem deste estudo.

Trabalho	Contexto e variáveis	Arquitetura tecnológica	Supervisão e alertas
Haque *et al*. [2019]	Ambiente agrícola experimental; monitoramento de variáveis ambientais.	Sistema sem fio com solução própria para aquisição e controle.	Dashboard não enfatizado; contempla controle e automação.
Rodrigues *et al*. [2021]	Protótipo de composteira; monitoramento de temperatura e umidade.	Sistema local baseado em ESP32 e processamento embarcado.	Dashboard não enfatizado; controle realizado localmente.
Seibel [2023]	Protótipo de compostagem; monitoramento de variáveis associadas ao processo.	Sistema embarcado com recursos de IoT e armazenamento próprio.	Apresenta dashboard e mecanismos de alerta.
Este trabalho	Ambiente operacional real; monitoramento da temperatura em leiras de compostagem.	Integração LoRaWAN/MQTT, middleware em Python, BigQuery e Power BI.	Dashboard operacional com alertas via Fabric Activator/Teams.

nova infraestrutura física de coleta, mas organiza, valida e integra os dados gerados pelo sistema existente a ferramentas de análise, visualização e automação de alertas.

A metodologia foi estruturada em quatro etapas principais: (i) caracterização da infraestrutura de coleta e transmissão de dados; (ii) extração, filtragem e pré-processamento dos registros armazenados no BigQuery; (iii) análise descritiva das séries temporais de temperatura; e (iv) desenvolvimento de mecanismos de visualização e automação por meio do Power BI, Fabric Activator e Microsoft Teams.

3.1 Caracterização do Ambiente de Estudo

O ambiente analisado corresponde ao pátio de compostagem da unidade da Bayer em Petrolina-PE, implantado em 2022 para processamento de resíduos orgânicos provenientes do cultivo protegido, jardinagem e refeitório. O ambiente operacional contempla 15 leiras de compostagem e utiliza 13 sensores Laird para o monitoramento térmico. Os sensores são instalados no interior da massa orgânica, aproximadamente a 60 cm de profundidade, quando há material em processo de decomposição.

Como o número de leiras é superior ao número de sensores disponíveis, nem todas as leiras apresentam necessariamente medições simultâneas durante todo o período de operação. A presença de registros para determinada leira depende da instalação e da disponibilidade do sensor durante o respectivo ciclo de compostagem.

A infraestrutura física de monitoramento já estava em operação antes do desenvolvimento deste estudo. Os sensores realizam medições de temperatura e transmitem os dados por meio de comunicação LoRaWAN para um *gateway*. Em seguida, os registros são encaminhados ao ambiente de armazenamento e análise, onde ficam disponíveis para consulta e processamento. Dessa forma, a contribuição metodológica deste trabalho concentra-se na validação computacional do fluxo de dados, na organização das medições, na construção de indicadores visuais e na configuração de alertas automáticos.

As análises quantitativas foram concentradas nos dispositivos e nas leiras que apresentaram registros válidos e consistentes no período considerado em cada análise. Essa distinção é importante, pois sensores podem apresentar diferenças de volumetria em função de fatores como disponibilidade da leira, manutenção, falhas de transmissão, reinicializações ou períodos sem material a ser monitorado.

3.2 Arquitetura Computacional do Sistema

A arquitetura utilizada neste estudo integra camadas de sensoriamento, comunicação, processamento, armazenamento, visualização e automação. A Figura 2 apresenta a organização geral do sistema, desde a coleta da temperatura nas leiras até o envio de notificações aos usuários responsáveis pelo acompanhamento operacional.

Na primeira camada, os sensores Laird realizam a medição da temperatura no interior das leiras. Em seguida, os dados são transmitidos por LoRaWAN, tecnologia adequada a aplicações IoT distribuídas por operar com baixo consumo energético e comunicação de longo alcance. O *gateway* LoRaWAN recebe os pacotes enviados pelos sensores e os encaminha para a camada de mensageria, na qual o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é utilizado para publicação e transporte das mensagens. Na etapa seguinte, um *middleware* desenvolvido em Python recebe essas mensagens, estrutura os registros e os disponibiliza para armazenamento no BigQuery.

O BigQuery atua como repositório analítico central, permitindo consultas, filtragens e consolidação dos dados de temperatura. A partir desse ambiente, o Power BI é utilizado para criação de painéis interativos, indicadores visuais e grá-

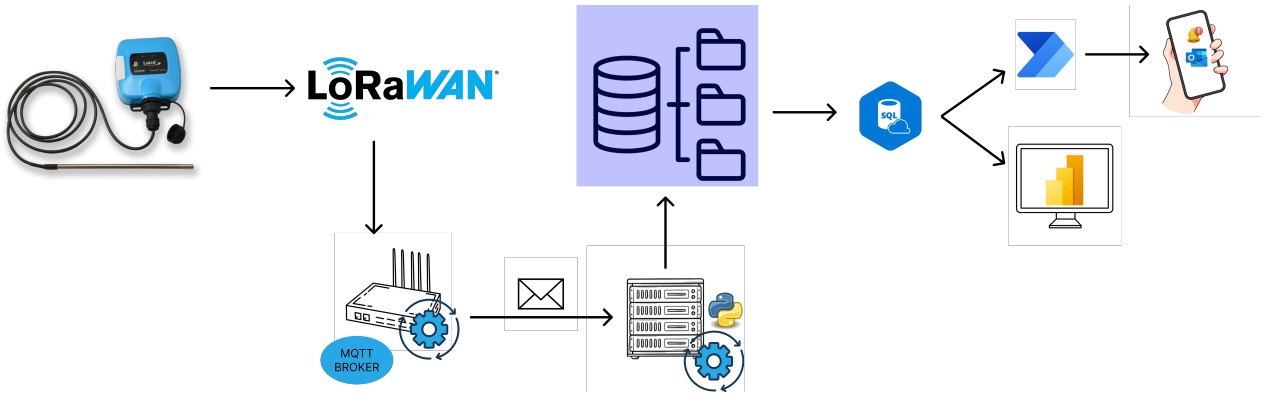


Figura 2. Arquitetura integrada do sistema, da coleta de dados à automação de alertas.

ficos históricos. Por fim, o Fabric Activator é empregado para configurar regras de automação baseadas em eventos térmicos, com envio de notificações pelo Microsoft Teams. Assim, a arquitetura não se limita à coleta de dados, mas estabelece um fluxo computacional completo entre medição, transmissão, processamento, armazenamento, análise, visualização e reação operacional.

3.3 Pilha de Comunicação e Integração

A solução analisada pode ser representada como uma pilha de comunicação e integração de dados, conforme apresentado na Tabela 2. Essa organização permite evidenciar os componentes computacionais envolvidos e a função de cada camada no processo de monitoramento.

A descrição em camadas também permite discutir características importantes da arquitetura, como escalabilidade, manutenção e tolerância a falhas. A inclusão de novos sensores ou leiras pode ser realizada mantendo o mesmo fluxo geral de ingestão e análise, desde que os novos dispositivos sejam corretamente identificados no *pipeline* de dados. Além disso, a separação entre coleta, comunicação, processamento, armazenamento e visualização facilita a identificação de falhas em pontos específicos, como ausência de transmissão, inconsistências temporais ou interrupções no recebimento dos registros.

3.4 Aquisição, Filtragem e Pré-processamento dos Dados

Os sensores foram configurados para registrar medições em intervalos de aproximadamente uma hora, resultando em até 24 leituras diárias por dispositivo em condições regulares de operação. Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir da base armazenada no BigQuery, considerando um intervalo de 100 dias de monitoramento. A extração foi realizada por meio de consulta SQL, apresentada no Apêndice **??**, com o objetivo de selecionar exclusivamente os registros associados aos sensores instalados no pátio de compostagem da unidade de Petrolina-PE.

O conjunto inicial continha registros brutos provenientes da infraestrutura IoT. Após a filtragem por local, tipo de dispositivo, variável de interesse e identificação dos sensores, foram consolidados os registros válidos utilizados nas análises. Essa distinção entre dados brutos e dados válidos é necessária porque bases operacionais podem conter medições de diferentes dispositivos, variáveis distintas, duplicidades, registros incompletos ou mensagens não associadas diretamente ao escopo do estudo.

A variável de temperatura armazenada no BigQuery estava originalmente identificada como *external_temperature_degF*, indicando valores em graus Fahrenheit. Antes da análise estatística e da construção dos indicadores, os valores foram convertidos para graus Celsius, conforme a Equação 1.

$$T_C = (T_F - 32) \times \frac{5}{9} \tag{1}$$

O pré-processamento incluiu a seleção dos sensores de interesse, remoção de duplicidades quando identificadas, padronização dos campos temporais, conversão da temperatura para graus Celsius e organização dos registros por sensor e data. Também foram verificadas a consistência temporal, a volumetria por dispositivo e a presença de lacunas de transmissão. Essas etapas permitiram avaliar se o conjunto de dados era adequado para a caracterização térmica das leiras e para a construção dos painéis de monitoramento.

3.5 Validação Computacional dos Registros

A validação computacional teve como objetivo verificar a confiabilidade do fluxo de dados, considerando a disponibilidade dos registros, sua distribuição temporal e a coerência dos valores armazenados. Para isso, foram avaliados os seguintes aspectos:

- **Integridade dos registros:** verificação da presença dos campos essenciais, como identificação do sensor, instante de medição, nome da variável e valor medido.
- **Consistência temporal:** análise da distribuição dos registros ao longo dos 100 dias, observando lacunas, intervalos sem transmissão e possíveis interrupções.
- **Volumetria por sensor:** contagem de registros por dispositivo, permitindo identificar sensores com maior ou menor disponibilidade de dados.
- **Consistência física dos valores:** verificação das faixas de temperatura após conversão para graus Celsius, com atenção a valores incompatíveis com o processo de compostagem.
- **Adequação para análise operacional:** avaliação da suficiência dos registros para construção de métricas,

gráficos e regras de alerta.

Essa etapa é particularmente relevante em sistemas IoT aplicados a ambientes reais, pois variações na quantidade de dados por sensor podem ocorrer em razão de falhas de comunicação, reinicializações, indisponibilidade de rede, manutenção dos dispositivos, ausência de material em determinada leira ou diferenças na configuração de envio das mensagens. Portanto, diferenças de volumetria não foram interpretadas automaticamente como falha crítica, mas como aspectos a serem analisados no contexto da operação.

3.6 Análise Descritiva das Temperaturas

Após o pré-processamento e a validação dos registros, foram calculadas métricas descritivas para caracterizar o comportamento térmico das leiras monitoradas. Para cada sensor, foram obtidos valores de média, desvio padrão, mínimo e máximo de temperatura. Essas métricas foram utilizadas para identificar diferenças entre sensores, avaliar a variabilidade térmica e reconhecer padrões compatíveis com diferentes fases do processo de compostagem, além de subsidiar a construção dos indicadores visuais e a definição das regras de alerta.

As faixas de referência utilizadas para interpretação dos dados foram baseadas nos estágios apresentados na Tabela 1. Em particular, a faixa termofílica, entre 45 °C e 65 °C, foi considerada relevante para acompanhamento operacional, uma vez que está associada à maior atividade microbiológica e à higienização do material. Valores abaixo ou acima dessa faixa foram utilizados como referência para análise de possíveis desvios térmicos.

Sempre que disponíveis, as informações sobre o início de formação das leiras foram consideradas para correlação com as séries temporais de temperatura, uma vez que a idade da leira influencia diretamente a fase predominante do processo. Caso essas datas não estejam disponíveis de forma estruturada no conjunto de dados, essa ausência é considerada uma limitação metodológica, pois restringe a associação direta entre o perfil térmico e o estágio cronológico da compostagem.

De forma semelhante, a temperatura ambiente externa constitui uma variável de referência relevante para a interpretação do comportamento térmico das leiras, especialmente nas fases de resfriamento e maturação. Na ausência de um sensor externo dedicado à temperatura ambiente no pátio, as análises ficam restritas às temperaturas internas das leiras, sendo essa ausência considerada uma limitação para comparação entre a temperatura do material em compostagem e as condições térmicas do ambiente.

3.7 Desenvolvimento do Dashboard e Indicadores Visuais

A etapa de visualização foi desenvolvida no Power BI, utilizando o BigQuery como fonte de dados. O objetivo do *dashboard* foi transformar os registros históricos de temperatura em informações de fácil interpretação para acompanhamento operacional. Para isso, foram construídos gráficos de séries temporais, indicadores de temperatura máxima, média e mínima, comparações entre sensores e classificações visuais das faixas térmicas.

Os indicadores foram organizados para permitir que o usuário identifique rapidamente a condição térmica de cada leira e observe tendências ao longo do tempo. A utilização de filtros por período e por sensor permite a análise individual ou comparativa das leiras. Além disso, a representação gráfica auxilia na identificação de picos, quedas abruptas, períodos de estabilidade e permanência em faixas compatíveis com a fase termofílica.

Nesse contexto, o *dashboard* não é tratado apenas como elemento visual, mas como parte da arquitetura computacional de apoio à decisão. Ele permite transformar registros numéricos em indicadores operacionais, reduzindo a necessidade de inspeção manual direta sobre grandes volumes de dados.

3.8 Automação de Alertas

A automação foi implementada por meio do Fabric Activator, integrado ao ambiente de visualização e ao Microsoft Teams. Foram definidas regras baseadas nas faixas térmicas de interesse para o processo de compostagem, com ênfase na identificação da entrada das leiras na faixa termofílica, considerada neste trabalho a partir de 45 °C.

Foram consideradas duas estratégias complementares de acompanhamento. A primeira corresponde ao acionamento de uma regra quando a temperatura monitorada atinge ou ultrapassa 45 °C. Essa condição sinaliza a entrada da leira na faixa termofílica adotada como referência no estudo e permite que os responsáveis sejam notificados sem a necessidade de acompanhamento contínuo do *dashboard*.

A segunda estratégia corresponde ao acompanhamento recorrente da condição térmica, permitindo o envio periódico de notificações enquanto a leira permanece em uma faixa de interesse para o processo. Dessa forma, o sistema contempla tanto a identificação do início de uma condição térmica relevante quanto seu acompanhamento ao longo do tempo.

As notificações são encaminhadas aos usuários definidos como destinatários no Fabric Activator por meio do Microsoft Teams. As mensagens podem conter informações associadas ao evento monitorado, como identificação da leira ou do sensor e a condição térmica responsável pelo acionamento da regra.

A automação baseada em eventos contribui para reduzir a dependência de verificação manual contínua do *dashboard*. No entanto, as notificações devem ser interpretadas como mecanismos de apoio ao acompanhamento operacional, e não como substitutas da avaliação técnica do processo de compostagem. A decisão sobre revolvimento, irrigação, inspeção ou outras ações deve considerar também informações complementares, como condição visual da leira, umidade, histórico de manejo e estágio do ciclo.

3.9 Considerações sobre Aspectos Computacionais

Além da análise térmica, a metodologia considera aspectos computacionais relevantes para sistemas distribuídos e IoT. A escalabilidade é observada pela possibilidade de inclusão de novos sensores e leiras no fluxo existente, desde que a identificação dos dispositivos seja incorporada às consultas e aos painéis. A tolerância a falhas é analisada a partir da detecção de lacunas, interrupções ou diferenças de volumetria entre sensores, embora o sistema atual não implemente

mecanismos automáticos de retransmissão ou recuperação de falhas.

A latência do sistema é considerada sob uma perspectiva operacional. Como o monitoramento da compostagem não exige resposta em tempo real estrito, atrasos da ordem de minutos podem ser aceitáveis, desde que os alertas sejam emitidos em tempo compatível com as ações de manejo. Em relação à segurança, a arquitetura depende dos mecanismos próprios das tecnologias utilizadas, como autenticação e criptografia na comunicação LoRaWAN e controle de acesso nas plataformas corporativas de armazenamento, visualização e notificação. Uma avaliação formal de segurança, entretanto, não faz parte do escopo deste trabalho e é indicada como possibilidade de investigação futura.

4 Resultados e Discussão

Esta seção apresenta os principais resultados obtidos com a organização e validação dos dados armazenados no BigQuery, a análise do comportamento térmico das leiras e a implementação das camadas de visualização e automação. Os achados são discutidos tanto sob a perspectiva do monitoramento térmico da compostagem quanto sob o ponto de vista computacional, considerando a integração entre aquisição de dados, armazenamento, análise e geração de alertas.

4.1 Validação e Organização dos Dados

A primeira etapa dos resultados concentrou-se na verificação da consistência dos registros provenientes da infraestrutura IoT já instalada na unidade. A consulta SQL aplicada ao BigQuery permitiu isolar exclusivamente os dados de temperatura associados às leiras do pátio de compostagem, removendo registros não relacionados ao escopo do estudo e estruturando uma base adequada às etapas posteriores de análise.

A inspeção do conjunto de dados confirmou que o fluxo de aquisição permaneceu operacional ao longo do período analisado, possibilitando a consolidação de um volume representativo de medições. A análise temporal dos registros também evidenciou diferenças de volumetria entre sensores, comportamento esperado em aplicações de campo, nas quais fatores como reinicializações, disponibilidade de material nas leiras, manutenção e oscilações de comunicação podem influenciar a quantidade de medições por dispositivo.

Do ponto de vista metodológico, esse resultado é relevante porque mostra que a etapa de validação não se restringe à contagem de registros, mas envolve a análise de integridade, consistência temporal e adequação do conjunto para uso analítico e operacional. Em sistemas IoT aplicados a ambientes reais, a qualidade do histórico armazenado é condição necessária para que gráficos, indicadores e alertas possam ser utilizados com confiabilidade.

4.2 Análise do Comportamento Térmico das Leiras

Após o pré-processamento e a validação dos registros, foram calculadas métricas descritivas para caracterizar o comportamento térmico das leiras monitoradas. A análise estatística e gráfica evidenciou comportamentos térmicos distintos entre as leiras ao longo do período observado, compatíveis com diferentes condições e momentos do processo de compostagem.

A Figura 3 apresenta a distribuição das temperaturas para as Leiras 04 a 09, selecionadas para a análise ilustrada. Observa-se que as Leiras 04 e 06 apresentaram temperaturas centrais mais elevadas e maior amplitude térmica, com registros alcançando valores superiores a 50 °C. Esses comportamentos são compatíveis com períodos de maior atividade térmica e com condições associadas à faixa termofílica. A Leira 07 também apresentou maior dispersão dos valores e registros superiores a 50 °C. Em contraste, as Leiras 05, 08 e 09 apresentaram distribuições mais concentradas e temperaturas centrais inferiores. Entretanto, somente a temperatura não permite determinar de forma inequívoca a fase biológica correspondente a cada leira, uma vez que sua interpretação também depende de informações como idade da leira, umidade, aeração e histórico de manejo.

A análise do boxplot reforça a heterogeneidade natural do processo de compostagem. Mesmo em um mesmo pátio, as leiras podem se encontrar em etapas distintas do ciclo biológico, refletindo diferenças de idade, manejo, umidade, revolvimento e composição do material. Dessa forma, o uso de estatísticas descritivas por leira é essencial para evitar interpretações generalistas baseadas apenas em médias globais.

Outro resultado relevante foi a identificação de uma temperatura máxima de 56,84 °C no conjunto apresentado pelo painel. Esse registro encontra-se dentro da faixa termofílica adotada como referência neste estudo, entre 45 °C e 65 °C, demonstrando que pelo menos parte das leiras monitoradas atingiu condições térmicas compatíveis com essa fase. O valor máximo isolado, entretanto, não permite inferir a duração da exposição térmica nem comprovar, por si só, a higienização do material.

4.3 Dashboard para Monitoramento Operacional

Com base nos dados estruturados, foi desenvolvido um *dashboard* no Power BI para acompanhamento operacional do processo. A interface do painel, apresentada na Figura 4, foi concebida para reunir, em um único ambiente visual, informações temporais, estatísticas e operacionais relevantes ao monitoramento das leiras.

Na parte superior do painel, os filtros de intervalo temporal e seleção de leiras permitem que o usuário realize análises específicas por período e por unidade monitorada. O gráfico de linhas apresenta a evolução temporal da temperatura média, permitindo identificar ciclos térmicos, elevações, quedas bruscas e períodos de estabilidade. Esse comportamento é especialmente útil para observar transições entre fases da compostagem e inferir momentos em que houve necessidade de intervenção.

O painel também incorpora um boxplot para comparação estatística entre leiras, um indicador de temperatura máxima atingida e uma tabela de métricas descritivas contendo informações como média, mínimo, máximo, amplitude, desvio padrão, quartis e medidas derivadas. Além disso, o *dashboard* integra um quadro de atividades das leiras, registrando eventos como irrigação e revolvimento, o que amplia a capacidade interpretativa do sistema ao relacionar alterações térmicas com ações operacionais efetivamente realizadas.

Do ponto de vista prático, a principal contribuição do *dashboard* está em transformar um volume elevado de registros brutos em um conjunto de indicadores de interpretação

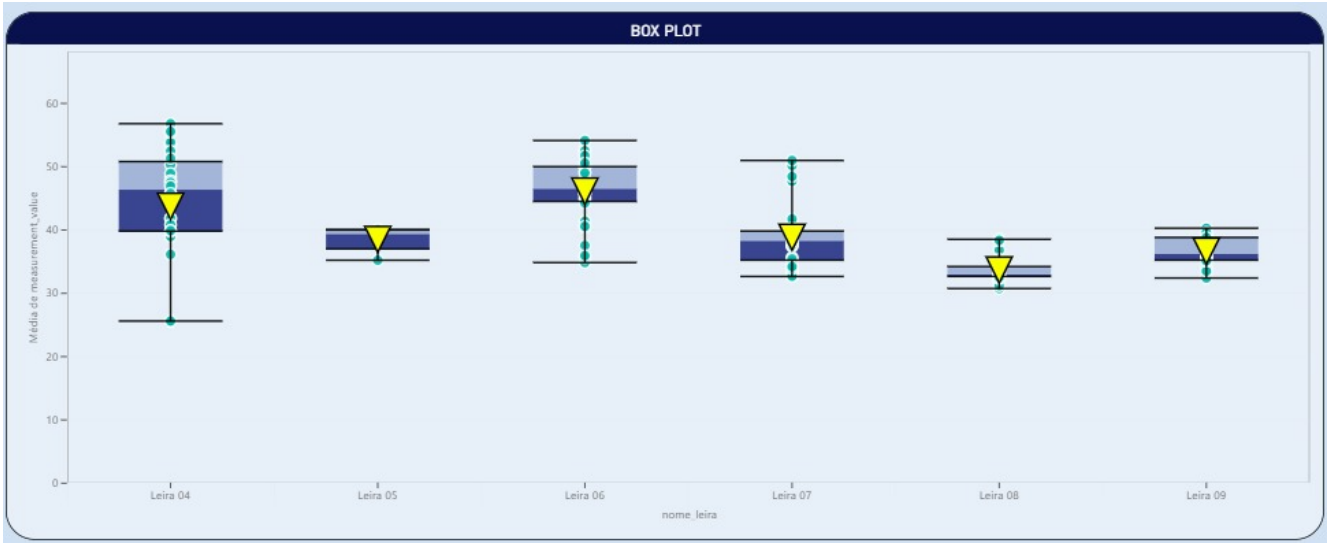


Figura 3. Distribuição das temperaturas registradas por leira no período analisado.

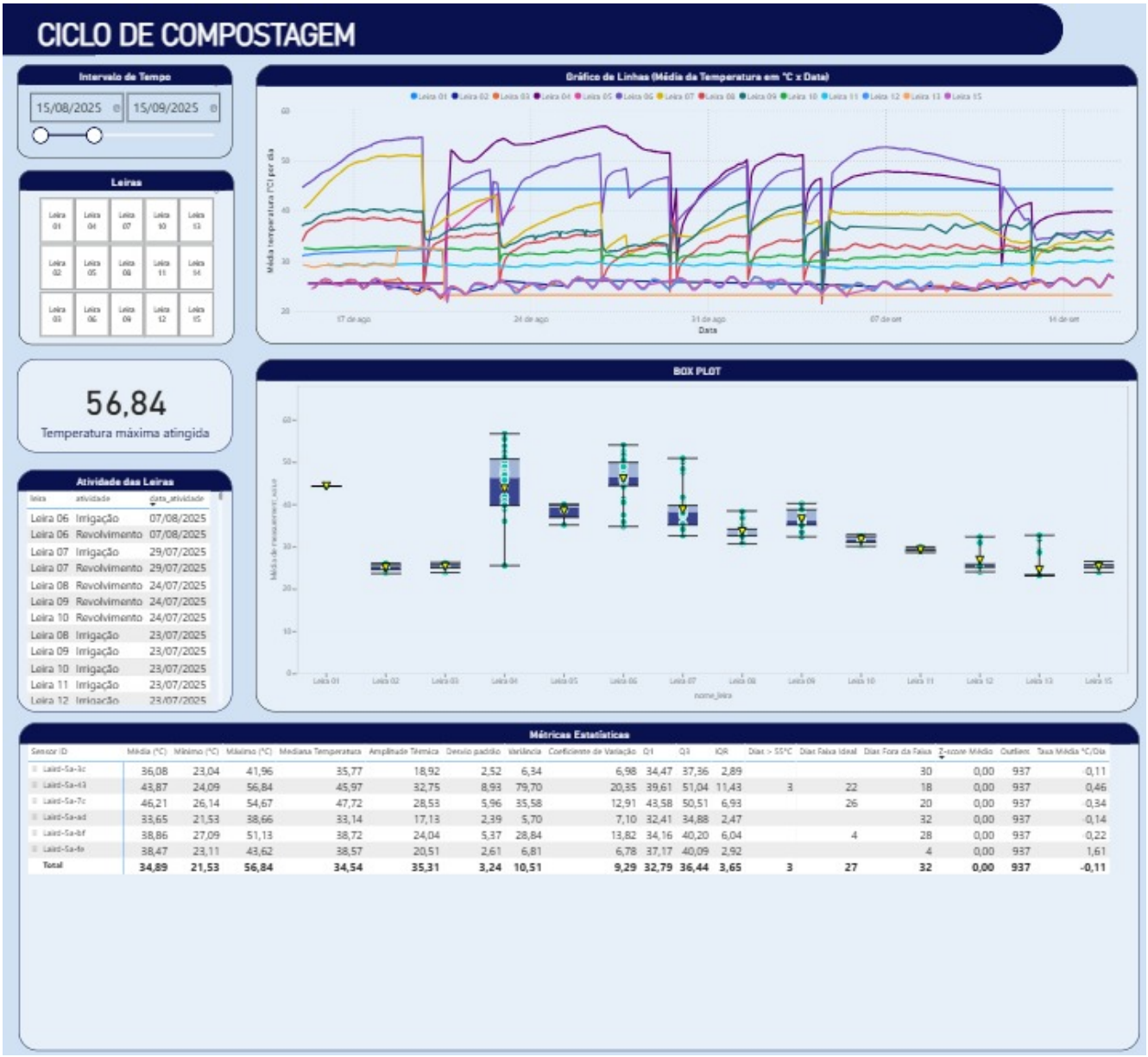


Figura 4. *Dashboard* desenvolvido no Power BI para acompanhamento das temperaturas das leiras.

imediata. Em vez de depender exclusivamente de consultas a banco de dados ou inspeção manual de séries extensas, a equipe pode identificar rapidamente padrões anormais e acompanhar a evolução do processo de forma mais clara e centralizada.

4.4 Automação de Alertas com Fabric Activator

Além da visualização dos dados, foi implementada uma camada de automação utilizando o Fabric Activator, integrada ao Power BI e ao Microsoft Teams. A Figura 5 apresenta a configuração de uma das regras efetivamente utilizadas no sistema.

Na configuração apresentada, o monitoramento está associado à métrica *last_measurement*. A condição utilizada corresponde ao acionamento da regra quando o valor monitorado atinge ou ultrapassa 45 °C. Considerando a faixa de referência adotada neste trabalho, esse limiar corresponde à entrada da leira na faixa termofílica.

Além da condição de acionamento, o Fabric Activator permite definir os usuários destinatários da notificação, o título da mensagem, seu conteúdo e o contexto associado ao evento. Dessa forma, a detecção da condição térmica ocorre automaticamente a partir dos dados disponibilizados ao ambiente de monitoramento.

A configuração demonstra que a solução desenvolvida não se limita à apresentação de informações históricas no *dashboard*. A arquitetura incorpora uma camada de reação automática a eventos, na qual condições identificadas nos dados podem gerar notificações para os responsáveis pelo acompanhamento operacional.

A Figura 6 apresenta uma ação de teste executada a partir da regra configurada no Fabric Activator e recebida no Microsoft Teams. O teste permitiu verificar o fluxo de integração entre o mecanismo de automação e o ambiente utilizado para entrega das notificações.

Na mensagem apresentada na Figura 6, observa-se a indicação de que se trata de uma ação de teste, bem como o título configurado para o alerta e a mensagem associada à condição térmica monitorada. Esse resultado confirma o funcionamento do mecanismo de entrega da notificação entre o Fabric Activator e o Microsoft Teams.

No sistema implementado, foram consideradas duas estratégias complementares de acompanhamento. A primeira corresponde à notificação associada ao atingimento do limiar de 45 °C, utilizado como referência para indicar a entrada na faixa termofílica. A segunda consiste no acompanhamento recorrente enquanto determinada condição térmica permanece ativa, permitindo que os responsáveis acompanhem sua evolução ao longo do tempo.

A combinação dessas estratégias permite utilizar a automação tanto para identificar o início de uma condição relevante quanto para acompanhar sua permanência. Dessa forma, o sistema reduz a necessidade de observação manual contínua do *dashboard*, mantendo os responsáveis informados sobre eventos térmicos de interesse.

4.5 Implicações Operacionais e Computacionais

Os resultados obtidos demonstram que a solução proposta contribui para ampliar o controle operacional do processo de compostagem. A integração entre sensoriamento distribuído, comunicação LoRaWAN, organização dos dados no BigQuery, visualização no Power BI e automação com Fabric Activator constitui um fluxo computacional completo, capaz de transformar medições contínuas em informações acionáveis.

Sob a perspectiva operacional, o sistema favorece a identificação antecipada de situações que exigem atenção, como entrada na faixa termofílica, oscilações abruptas ou comportamentos térmicos persistentes. Isso contribui para reduzir o intervalo entre a ocorrência de um evento e sua percepção pela equipe responsável, aumentando a capacidade de resposta e a rastreabilidade do processo.

Sob a perspectiva da Engenharia da Computação, a principal contribuição está na estruturação de uma arquitetura aplicada em ambiente real, integrando coleta, transmissão, tratamento, armazenamento, visualização e reação automática. O trabalho mostra que uma infraestrutura previamente instalada pode ser reorganizada e potencializada por meio de ferramentas analíticas e mecanismos de automação, sem necessidade de substituição integral da camada física de monitoramento.

Apesar dos avanços observados, os resultados também devem ser interpretados à luz das limitações do estudo. A temperatura foi tratada como variável central, mas não representa isoladamente todas as condições necessárias à avaliação completa da compostagem. Variáveis como umidade, oxigenação, composição do material e histórico detalhado de manejo influenciam o processo e podem ser incorporadas em estudos futuros para ampliar a robustez da análise.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou a organização, validação e estruturação computacional dos dados de temperatura coletados no pátio de compostagem da unidade da Bayer em Petrolina-PE, integrando a infraestrutura IoT existente a ferramentas de armazenamento, análise, visualização e automação. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que o fluxo de dados disponível foi capaz de sustentar análises descritivas do comportamento térmico das leiras e a construção de mecanismos de apoio ao acompanhamento operacional.

A análise dos registros armazenados no BigQuery mostrou que a base de dados possui volume e consistência suficientes para uso analítico, desde que submetida a etapas de filtragem, organização e verificação temporal. A análise térmica evidenciou diferenças relevantes entre as leiras, confirmando a heterogeneidade do processo de compostagem e a importância do monitoramento individualizado para interpretação adequada do comportamento de cada unidade.

O *dashboard* desenvolvido no Power BI demonstrou ser uma ferramenta eficaz para sintetizar grandes volumes de dados em indicadores visuais e gráficos de interpretação rápida. A integração de filtros, séries temporais, estatísticas descritivas e histórico de atividades ampliou a capacidade de acompanhamento do processo, tornando a análise mais

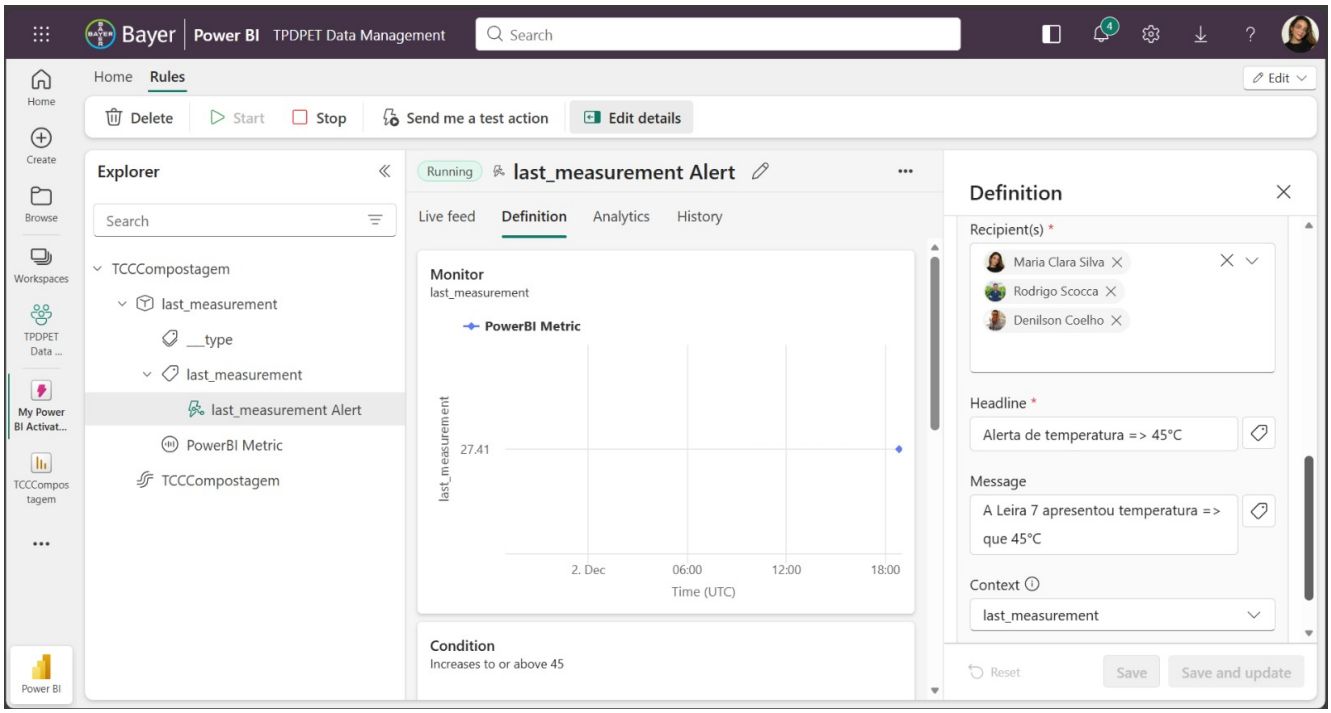


Figura 5. Configuração da regra de monitoramento de temperatura no Fabric Activator.

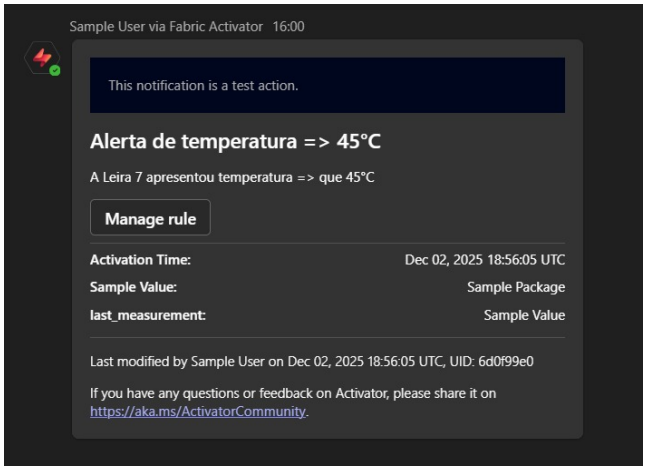


Figura 6. Notificação de teste gerada pelo Fabric Activator e recebida no Microsoft Teams.

acessível e operacionalmente útil.

A automação implementada com o Fabric Activator, por sua vez, acrescentou uma camada de reação automática aos eventos monitorados. A configuração de regras para envio de notificações via Microsoft Teams mostrou-se adequada para reduzir a dependência da inspeção manual contínua, permitindo acompanhamento mais proativo e maior agilidade na percepção de condições térmicas relevantes.

Em síntese, o trabalho demonstra que a combinação entre IoT, análise de dados e automação pode fortalecer práticas de monitoramento aplicadas à compostagem em ambiente operacional real. A principal contribuição está na validação e integração computacional de uma infraestrutura já existente, transformando medições contínuas em suporte efetivo à tomada de decisão.

Como trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise temporal dos ciclos de compostagem, incorporando métricas adicionais, como umidade e tempo de permanência em cada fase. Também é possível evoluir para modelos preditivos, capazes de antecipar desvios ou estimar o momento ideal para revolvimento, além de explorar integrações com sensores adicionais ou sistemas corporativos de gestão agrícola. Tais avanços podem aproximar o ambiente de compostagem de um sistema ciberfísico mais automatizado e inteligente.

Declarações complementares

Contribuições dos autores

MCMS trabalhou na concepção do estudo, desenvolvimento da metodologia, análise e interpretação dos dados e redação do manuscrito. JSS, AJFOB, DLAX e RFS atuaram na supervisão, revisão crítica do manuscrito e validação dos resultados.

Conflitos de interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Disponibilidade de artefatos de pequisa

Os dados e outros materiais criados e/ou usados neste artigo serão disponibilizados mediante solicitação.

Uso de Inteligência Artificial

Os autores utilizaram ferramentas de IA generativa durante o desenvolvimento deste trabalho, incluindo ChatGPT (versão GPT-5.1) e Google Gemini (versão 2.5 Flash). Essas ferramentas foram empregadas exclusivamente para apoiar tarefas não autorais, tais como: busca preliminar por referências e temas relacionados à compostagem e ao monitoramento ambiental; revisão textual para melhoria de clareza e coerência; auxílio na formatação do documento em LaTeX; e elaboração de descrições técnicas de figuras e diagramas presentes no trabalho. Nenhum conteúdo foi utilizado sem verificação, e todas as decisões conceituais, metodológicas e analíticas permanecem sob responsabilidade integral dos autores.

Referências

(2016). ISO/IEC 20922:2016: Information technology – Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) v3.1.1.

Albino, J. d. S., Silva, M. A. d., Silva, P. M. M., and Ferreira, T. d. O. (2021). Impacto da compostagem na redução do lixo residencial. Curso Técnico em Meio Ambiente. Acesso em: 9 jun. 2026.

Almeida, D. P. d. *et al*. (2021). Aplicação de dashboards interativos para o monitoramento de indicadores operacionais em tempo real. *Revista Gestão & Tecnologia*, 21(1):85–101. Acesso em: 10 abr. 2025.

Brietzke, D. T. (2017). Avaliação do processo de compostagem considerando a relação carbono/nitrogênio.

EMBRAPA (2024). *Eventos Técnicos & Científicos 1*. Embrapa, Brasília, DF. Acesso em: 20 mar. 2025.

Farooq, A. *et al*. (2022). Composting: A sustainable approach for organic waste management and value-added product formation. *Journal of Cleaner Production*, 343:130833.

Haque, M. S. T., Rouf, K. A., Khan, Z. A., Emran, A., and Zishan, M. S. R. (2019). Design and implementation of an iot based automated agricultural monitoring and control system. In *2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)*, pages 13–16, Dhaka, Bangladesh. DOI: 10.1109/ICREST.2019.8644212.

Lacanne, C. E. and Lundgren, J. G. (2018). Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, 6:e4428.

Pedrosa, T. D., Farias, C. A. S., Pereira, R. A., and Farias, E. T. d. R. (2015). Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. *Nativa*, 1(1):1–9. Acesso em: 2 abr. 2025.

Prieto, P. M. C. (2019). Aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos mediante a técnica da compostagem para utilização em áreas degradadas. Acesso em: 5 abr. 2025.

Rashid, M. I. *et al*. (2021). Composting process: Enhancing nutrient transformation and microbial activities. *Agronomy*, 11(3):556.

Rodrigues, L. D., Pereira, R. M., Palmeira, D. W. F., Silva, G. H. A., Leite, M. A. F., and Silva, J. S. (2021). Controle de temperatura e de umidade de uma composteira utilizando o esp32. In *Anais do 13. Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAGRO)*, pages 53–61, Evento Online. Sociedade Brasileira de Computação. Acesso em: 6 abr. 2025.

Schreefel, L. *et al*. (2020). Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Security*, 26:100404.

Seibel, T. L. (2023). Sistema de monitoramento e controle de compostagem baseado em internet das coisas (iot). Acesso em: 15 abr. 2025.

Singh, M. and Kulshreshtha, S. (2021). Bioremediation of organic waste through composting: A review. *Environmental Technology & Innovation*, 23:101708.