

REDUÇÃO DE PERDAS PÓS-COLHEITA NA BANANICULTURA: CONTROLE AMBIENTAL EM CÂMARAS DE CONSERVAÇÃO COM IOT

Diogo Evaldt Webber¹, Sergio Coral²

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a avaliação de um protótipo de baixo custo baseado em Internet das Coisas (IoT) para monitoramento e controle ambiental assistido na conservação pós-colheita de bananas. O sistema foi aplicado em uma caixa experimental dividida em dois compartimentos, sendo um com atuadores e outro sem intervenção automática, permitindo a comparação entre um ambiente controlado de forma assistida e um ambiente passivo. A solução integrou sensores de temperatura, umidade e gases/compostos orgânicos voláteis, atuadores de ventilação e umidificação, câmeras ESP32-CAM, comunicação baseada em troca de mensagens, camada de servidor (*backend*), banco de dados PostgreSQL e interface de supervisão. Foram realizadas duas validações experimentais com bananas tipo Maçã, cultivar BRS Princesa. Os resultados indicaram viabilidade técnica do protótipo, especialmente no manejo da umidade relativa e na renovação do ar. Em relação à temperatura, observou-se efeito limitado, pois o sistema não possui refrigeração ativa. As imagens dos frutos foram utilizadas como apoio qualitativo à análise ambiental. Conclui-se que a proposta apresenta potencial como ferramenta de monitoramento, automação e apoio à conservação pós-colheita em pequena escala.

Palavras-chave: internet das coisas; pós-colheita; banana; controle ambiental; automação.

ABSTRACT: This paper presents the development and evaluation of a low-cost prototype based on the Internet of Things for assisted environmental monitoring and control applied to postharvest banana conservation. The system was implemented in an experimental box divided into two compartments: one with actuators and another without automatic intervention, allowing comparison between an assisted controlled environment and a pas-

¹Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. diogoevaldt17@unesc.net

²Orientador, Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (Unesc), Criciúma - Santa Catarina - Brasil. sergiocoral@unesc.net

sive environment. The solution integrated temperature, humidity and volatile organic compound sensors, ventilation and humidification actuators, ESP32-CAM cameras, message-based communication, a server-side layer (*backend*), a PostgreSQL database and a supervision interface. Two experimental validations were carried out using Maçã-type bananas, cultivar BRS Princesa. The results indicated the technical feasibility of the prototype, especially for relative humidity management and air renewal. Regarding temperature, the effect was limited, since the system does not include active refrigeration. Fruit images were used as qualitative support for the environmental analysis. It is concluded that the proposed system has potential as a monitoring, automation and support tool for small-scale postharvest conservation.

Keywords: internet of things; postharvest; banana; environmental control; automation.

1 INTRODUÇÃO

A bananicultura constitui um setor relevante do agronegócio brasileiro, destacando-se tanto pelo volume de produção quanto pela sua importância socioeconômica. Em 2023, o Brasil produziu aproximadamente 7 milhões de toneladas de banana, consolidando-se entre os maiores produtores mundiais (IBGE, 2023). Além disso, a fruta apresenta elevada demanda no mercado interno, sendo amplamente consumida pela população e contribuindo diretamente para a segurança alimentar.

Apesar de sua relevância, a cadeia produtiva da banana enfrenta desafios significativos, especialmente relacionados à alta perecibilidade do fruto. Após a colheita, a rápida evolução do processo de amadurecimento compromete a qualidade do produto, reduz seu tempo de comercialização e intensifica as perdas ao longo da cadeia logística. Em alguns casos, as perdas pós-colheita podem atingir níveis expressivos, impactando diretamente a rentabilidade dos produtores e contribuindo para o desperdício de alimentos.

Entre os fatores que aceleram a deterioração, destacam-se as condições ambientais inadequadas, como temperatura, umidade e concentração de etileno. Esse gás atua como regulador do amadurecimento em frutos climatéricos, como a banana, estando associado a processos fisiológicos que envolvem amadurecimento da polpa e da casca (Inaba et al., 2007). Assim, o controle das condições ambientais relacionadas à tempe-

ratura, umidade e gases torna-se um aspecto crítico no armazenamento pós-colheita (Kader, 2002).

A Internet das Coisas (IoT) é definida como um paradigma que possibilita a interconexão de objetos físicos por meio da internet, permitindo a coleta, troca e processamento de dados entre dispositivos e sistemas computacionais (Atzori; Iera; Morabito, 2010). No contexto agrícola, soluções baseadas em IoT têm sido aplicadas para monitoramento ambiental, automação de processos, tomada de decisão e integração entre sensores, atuadores e sistemas computacionais, contribuindo para a modernização da agricultura (Tzounis et al., 2017). Esses dispositivos podem variar desde sensores simples até equipamentos industriais complexos, sendo aplicados em diferentes setores, como cidades inteligentes, saúde, indústria e agricultura (Atzori; Iera; Morabito, 2010; Silva, 2024).

Essas soluções utilizam sensores para acompanhar variáveis ambientais e auxiliar na tomada de decisão durante o armazenamento. No entanto, muitas dessas abordagens apresentam caráter predominantemente passivo, limitando-se ao diagnóstico das condições sem atuar diretamente sobre o ambiente.

Por outro lado, existem também propostas voltadas ao controle ativo das condições ambientais, integrando sensores e atuadores para regular variáveis como temperatura e umidade.

Apesar desse avanço, tais soluções frequentemente envolvem maior complexidade estrutural e custos elevados, além de serem, em muitos casos, direcionadas a aplicações distintas do contexto agrícola, como o conforto térmico em ambientes internos.

Em aplicações mais próximas de sistemas biológicos, estudos demonstram a viabilidade do uso de arquiteturas de baixo custo para controle de microclimas, evidenciando que a automação de variáveis ambientais pode impactar diretamente na qualidade e produtividade.

Entretanto, observa-se que as soluções existentes ainda apresentam limitações quanto à integração entre monitoramento e controle ativo em soluções acessíveis e de fácil implementação, especialmente no armazenamento pós-colheita de frutas climatéricas como a banana.

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é desenvolver e validar funcionalmente um protótipo de sistema de monitoramento e controle ambiental assistido, baseado em Internet das Coisas (IoT), aplicado ao armazenamento pós-colheita de bananas. Para isso, são consideradas as etapas de monitoramento de temperatura, umidade relativa e leitura

relativa de gases/compostos orgânicos voláteis (VOCs), integração de sensores, atuadores, câmeras, comunicação pelo protocolo Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), camada de servidor (*backend*), banco de dados e interface de supervisão. A avaliação do sistema concentra-se na verificação da viabilidade funcional do protótipo, na comparação descritiva entre um compartimento com atuadores e outro sem atuadores e no acompanhamento qualitativo da evolução visual dos frutos.

A redução de perdas e desperdícios de alimentos é reconhecida internacionalmente como um desafio relevante para a segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e eficiência econômica das cadeias produtivas (FAO, 2019). No caso da banana, as perdas pós-colheita representam um dos principais desafios para a sustentabilidade do setor, podendo atingir valores próximos a 40% da produção nacional (Embrapa, 2021). Esse cenário impacta diretamente a rentabilidade dos produtores e contribui para o desperdício de alimentos, sendo agravado por fatores como danos mecânicos e o amadurecimento acelerado dos frutos (Souza; Pereira; Sousa, 2021). Como consequência, muitos produtores são pressionados a comercializar sua produção em prazos reduzidos e por preços inferiores, evidenciando a necessidade de soluções mais eficientes para o controle do processo pós-colheita.

Embora existam técnicas consolidadas para prolongar a vida útil dos frutos, como o controle de temperatura, umidade e concentração de gases, as soluções comerciais disponíveis frequentemente apresentam custos elevados e maior complexidade de implementação, o que limita sua adoção por pequenos e médios produtores (Embrapa, 2021; Souza; Pereira; Sousa, 2021). Diante desse cenário, destaca-se a necessidade de desenvolvimento de alternativas tecnológicas acessíveis, capazes de integrar monitoramento e controle ambiental de forma automatizada e economicamente viável.

Nesse contexto, a contribuição esperada está na disponibilização de uma alternativa de baixo custo e de fácil implementação para apoiar o monitoramento e o controle das condições de armazenamento. Espera-se que a solução contribua para a melhoria das condições de conservação dos frutos e ofereça uma base tecnológica acessível para futuras aplicações voltadas à redução de perdas pós-colheita na bananicultura.

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. No Capítulo 1, apresenta-se a introdução, na qual são abordados o contexto do problema, os objetivos e a justificativa da pesquisa. O Capítulo 2 contempla a revisão

dos trabalhos correlatos, fornecendo embasamento teórico para o estudo. No Capítulo 3, são descritos os materiais e métodos utilizados, incluindo as tecnologias empregadas e a metodologia de desenvolvimento. O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, bem como sua análise e discussão. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho.

2 TRABALHOS CORRELATOS

Nesta seção, analisamos os trabalhos correlatos, focando em duas áreas principais: sistemas de monitoramento de maturação (passivos) e sistemas de controle ativo de ambiente.

Uma referência central na área de monitoramento é o trabalho de Silva (2024), que desenvolveu um sistema IoT focado no diagnóstico preciso dos estágios de maturação de frutas. A arquitetura proposta utiliza sensores de cor e gás etileno, juntamente com uma rede neural, para classificar o estado do produto. Embora eficaz na classificação, a abordagem de Silva (2024) atua de forma passiva, terminando a sua função no diagnóstico, sem intervir ativamente no ambiente de armazenamento.

Avançando para o controle ativo, a literatura apresenta soluções para diferentes domínios. Dantas (2024) propõe um sistema de monitoramento ambiental que não apenas lê sensores de umidade e gases, mas também implementa a automatização de dispositivos. No entanto, o foco de Dantas (2024) é o conforto humano, e sua abordagem está associada a um custo energético e de implementação mais elevado (devido ao uso do ar-condicionado).

Mais próximo da proposta deste TCC em termos de custo e aplicação em processos biológicos sensíveis, destacam-se os trabalhos voltados à fungicultura. Rodrigues e Coelho (2022) desenvolveram um sistema de controle ativo de temperatura e umidade utilizando técnicas de controle PI e On-Off, demonstrando a viabilidade de arquiteturas de baixo custo.

Complementando esta visão, Andrade (2020) apresentou um sistema completo de automação para o cultivo de *Agaricus bisporus* (champignon), integrando sensores de solo e ambiente com uma arquitetura robusta composta por Arduino, Raspberry Pi e um servidor Web Java com aplicativo móvel. O diferencial de Andrade (2020) foi a validação experimental comparativa, onde a estufa automatizada (com controle de arrefecimento e irrigação) resultou em cogumelos com maior peso médio por unidade (27,8g contra 22,1g na estufa natural), validando a eficiência do controle ativo em microclimas.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção apresenta o objeto de estudo, o delineamento da pesquisa, os materiais empregados, os procedimentos metodológicos e os critérios utilizados na análise dos dados.

3.1 DESCRIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO

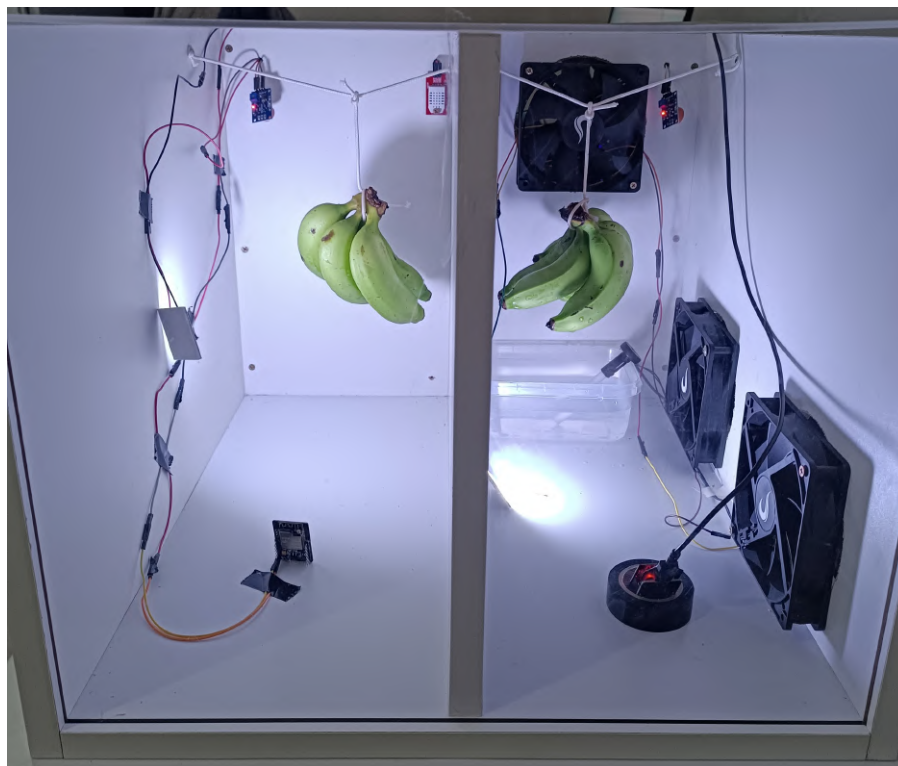
O objeto de estudo deste trabalho consistiu no desenvolvimento e na avaliação de um sistema IoT de baixo custo para monitoramento e controle ambiental assistido em uma caixa de conservação de bananas dividida em dois compartimentos. O sistema foi proposto para atuar sobre condições associadas ao amadurecimento pós-colheita, especialmente temperatura, umidade relativa do ar, renovação do ar interno e acúmulo de gases/VOCs.

Para a validação experimental, foram realizados dois ensaios com bananas tipo Maçã, cultivar BRS Princesa. Na primeira validação, foi utilizada uma penca dividida em duas partes, com cinco unidades destinadas ao compartimento com atuadores e cinco unidades ao compartimento sem atuadores. Esse acompanhamento foi realizado ao longo de 11 dias, entre 17/05/2026 e 28/05/2026.

Na segunda validação experimental, iniciada em 01/06/2026, foi utilizada a mesma variedade de banana, com cinco unidades destinadas ao compartimento com atuadores e cinco unidades ao compartimento sem atuadores. Essa etapa foi planejada para acompanhamento até 07/06/2026, mantendo a comparação entre o ambiente submetido ao controle assistido e o ambiente passivo.

Foi utilizada uma caixa experimental dividida internamente em dois compartimentos, apresentada na Figura 1. O compartimento com atuadores, localizado à direita, recebeu sensores de temperatura, umidade relativa e gás/VOCs, três ventiladores, um umidificador, dispositivos de comunicação e câmeras ESP32-CAM. O ventilador 1 foi utilizado como exaustor, enquanto os ventiladores 2 e 3 foram empregados como entradas de ar, favorecendo a renovação do ambiente interno. O compartimento sem atuadores, localizado à esquerda, foi mantido como ambiente comparativo passivo, sem mecanismos automáticos de ventilação ou umidificação. Essa configuração permitiu comparar o comportamento de um ambiente com controle ambiental assistido com outro sem intervenção automática no mesmo aparato experimental. O aparato foi mantido em ambiente interno, sem controle climático externo.

Figura 1 - Estrutura física da caixa experimental com divisória interna



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 DELINEAMENTO DA PESQUISA

A pesquisa foi caracterizada como aplicada, experimental e de abordagem predominantemente quantitativa. Foi aplicada por buscar uma solução prática para apoio à conservação pós-colheita de bananas; experimental por envolver a construção, integração e operação de uma caixa experimental monitorada; e quantitativa por utilizar medições contínuas de temperatura, umidade relativa e leitura analógica de gás como base para análise.

As variáveis ambientais analisadas foram temperatura do ar, umidade relativa e leitura do sensor MQ-3. A temperatura e a umidade foram obtidas por sensores DHT22, enquanto a variável de gás foi obtida por leitura analógica do MQ-3, expressa em valores fornecidos pelo conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador. O MQ-3 foi utilizado como indicador indireto da variação de gases/compostos orgânicos voláteis no ambiente, sem conversão para concentração específica de etileno em ppm.

O delineamento experimental considerou o sistema como instrumento de pesquisa e de intervenção parcial sobre o microambiente. No compartimento com atuadores, o sistema realizou monitoramento e aciona-

mento automático de ventiladores e umidificador. No compartimento sem atuadores, o sistema manteve apenas a função de monitoramento, permitindo comparação com um ambiente sem controle ambiental assistido.

Como o protótipo não utilizou compressor, pastilha termoeletrica ou outro mecanismo de refrigeração ativa, o controle de temperatura foi tratado como indireto e limitado. Assim, a automação foi direcionada à mitigação de condições desfavoráveis, por meio da renovação do ar, remoção de gases/VOCs, circulação interna e recomposição da umidade relativa.

3.3 MATERIAIS EMPREGADOS

Os materiais de hardware e software foram selecionados com base em disponibilidade, baixo custo, compatibilidade com aplicações IoT e possibilidade de reprodução em escala de protótipo. A escolha dos componentes priorizou integração com Wi-Fi, leitura de sensores, acionamento de cargas por relés e comunicação com serviços de backend.

Na etapa inicial do desenvolvimento, foi utilizado o modelo T-OI Plus ESP32-C3 RISC-V MCU Wireless Module Development Circuits Board. Esse módulo permitiu a validação inicial da comunicação sem fio e das leituras de sensores, porém apresentou limitações práticas durante a integração do circuito completo. A quantidade de portas lógicas disponíveis reduziu a margem para expansão do sistema e dificultou a organização simultânea de sensores, relés e periféricos. Além disso, durante o setup experimental foram observados episódios de reinicialização do ESP32 associados à integração elétrica dos atuadores, o que indicou a necessidade de rever a arquitetura de hardware.

Em função dessas limitações, o projeto passou a utilizar um módulo ESP32 com maior disponibilidade de pinos e melhor adequação ao protótipo. A substituição foi uma decisão técnica tomada para melhorar a estabilidade da montagem, simplificar a distribuição dos sinais e ampliar a possibilidade de integração entre sensores e atuadores. O módulo adotado possui CPU Xtensa Dual-Core 32-bit LX6, clock máximo de 240 MHz, 448 KBytes de ROM, 520 KBytes de RAM, 4 MB de memória flash, Wi-Fi 802.11 b/g/n em 2,4 GHz, Bluetooth BLE 4.2, 30 pinos GPIO, isto é, entradas e saídas de uso geral, com suporte a PWM, I2C, SPI e ADC. Também dispõe de alimentação na faixa de 4,5 V a 9 V, interface micro-USB e antena embutida. Para este estudo, as características mais relevantes foram a conectividade Wi-Fi, a disponibilidade de entradas e saídas digitais e analógicas e a maior flexibilidade para acomodar o circuito do protótipo.

Para alimentação do sistema, foram empregados níveis distintos de tensão conforme as características elétricas dos componentes. As ventoinhas foram alimentadas por uma fonte chaveada de 12 V e 10 A, com potência nominal de 120 W. A partir dessa tensão, foi utilizado um conversor *step-down* LM2596 ajustável para gerar 5 V, tensão empregada no sensor MQ-3, no módulo de relés e no umidificador. Os sensores DHT22 foram alimentados pela saída de 3,3 V do microcontrolador, em conformidade com sua faixa de operação.

O acionamento dos atuadores foi realizado por meio de um módulo relé de 4 canais, 5 V, com optoacoplamento e capacidade nominal de até 10 A. Um canal foi destinado ao umidificador e os outros três às ventoinhas. O uso de um módulo com optoacoplamento contribuiu para isolar a lógica do microcontrolador das cargas acionadas, reduzindo interferências elétricas e simplificando a montagem física. Essa característica foi relevante porque o protótipo combinou cargas de ventilação, alimentação externa e sinais de baixa tensão em um mesmo aparato experimental.

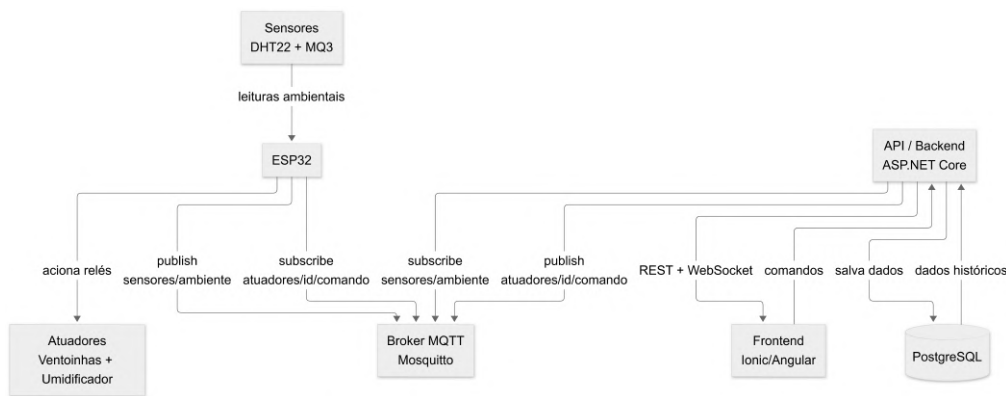
No sensoriamento ambiental, foram utilizados sensores DHT22 para temperatura e umidade relativa do ar e sensores MQ-3 para leitura de gás/VOCs. O MQ-3 foi mantido como sensor de resposta relativa, útil para acompanhar variações do ambiente interno, mas sem interpretação como medidor seletivo de etileno. Como a saída analógica do sensor pode ultrapassar a faixa segura de leitura do ESP32, foi empregado divisor resistivo para adequação do sinal à entrada analógica de 3,3 V.

Para acompanhamento visual, foram utilizadas duas câmeras ESP32-CAM, módulos de câmera baseados na plataforma ESP32. Cada câmera foi configurada como dispositivo independente conectado à rede Wi-Fi, com envio de status, resposta a comandos e publicação de imagens por meio do protocolo MQTT. As capturas foram transmitidas em formato JPEG e armazenadas no backend, possibilitando consulta posterior e formação de sequência temporal de imagens.

Na camada de software, foi utilizada uma Interface de Programação de Aplicações (API) desenvolvida em C# com .NET, associada ao Entity Framework Core para acesso ao banco de dados PostgreSQL. O protocolo MQTT foi adotado como barramento de comunicação entre os dispositivos embarcados e o backend, com tópicos específicos para telemetria, comandos, estado dos atuadores e câmeras. A interface de supervisão foi desenvolvida em Angular/Ionic, permitindo consulta de dados históricos, monitoramento em tempo real, acompanhamento do estado dos atuado-

res, visualização dos registros de automação (*logs*) e acesso às imagens capturadas. A organização geral desses componentes é apresentada na Figura 2.

Figura 2 - Arquitetura geral do sistema IoT desenvolvido



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Figura 2, o ESP32 realiza a coleta das leituras ambientais e publica os dados no broker MQTT. A API permanece inscrita nos tópicos MQTT, processa as mensagens recebidas, persiste as informações no PostgreSQL e disponibiliza os dados para visualização na aplicação de interface do usuário (*frontend*).

3.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O desenvolvimento do sistema foi conduzido em etapas sucessivas, contemplando comunicação, coleta de dados, persistência, acionamento dos atuadores, integração das câmeras, automação e análise dos dados. Essa organização permitiu validar gradualmente cada camada do protótipo antes da execução dos ensaios experimentais.

Inicialmente, foi implementada a API em *C#* e *.NET* para recepção de mensagens MQTT contendo leituras ambientais publicadas pelo ESP32 no tópico `sensores/ambiente`. Em seguida, foi incorporada a persistência em PostgreSQL com Entity Framework Core, permitindo armazenar temperatura, umidade relativa, leitura de gás/VOCs, identificação dos sensores e instante das coletas. Paralelamente, o programa embarcado (*firmware*) do microcontrolador foi estruturado para leitura dos sensores, envio de telemetria, armazenamento local temporário e acionamento dos atuadores.

Durante a integração eletrônica, o uso inicial do ESP32-C3 mostrou limitações quanto à quantidade de pinos disponíveis e à estabilidade da

montagem com sensores, relés e periféricos operando simultaneamente. Com base nesses testes, o circuito foi reorganizado com um módulo ESP32 de maior disponibilidade de pinos. Também foi separada a alimentação lógica da alimentação dos atuadores, reduzindo reinicializações durante o acionamento dos relés. A saída analógica do sensor MQ-3 foi condicionada por divisor de tensão para adequação à faixa de leitura do ADC do ESP32.

Para aumentar a tolerância a falhas de comunicação, foi implementado um armazenamento temporário local em SPI Flash File System (SPIFFS) no ESP32. Esse recurso armazenou temporariamente mensagens não transmitidas e permitiu o reenvio posterior quando a conexão MQTT estivesse novamente disponível. No backend, um serviço em segundo plano permaneceu inscrito nos tópicos MQTT, processando leituras ambientais, estados dos atuadores e mensagens das câmeras.

Após a estabilização da coleta e da comunicação, foram integrados os atuadores de ventilação e umidificação. Os comandos passaram a ser enviados pelo backend por meio de tópicos MQTT no formato `atuadores/{id}/comando`, enquanto o ESP32 ficou responsável pela execução física dos acionamentos e pela publicação do estado efetivo em tópicos de retorno. Essa confirmação permitiu que a interface representasse o estado físico dos atuadores com menor dependência do último comando enviado.

As câmeras ESP32-CAM foram integradas como dispositivos MQTT independentes. Cada câmera publicou periodicamente seu estado, recebeu comandos de captura, ajuste de intervalo e acionamento do flash, e enviou imagens JPEG para recomposição e armazenamento no backend. Esse recurso permitiu formar um histórico visual complementar dos frutos ao longo do experimento.

A lógica automática de decisão foi centralizada no backend. Em cada ciclo de automação, o sistema analisou leituras recentes do compartimento com atuadores, tendências de temperatura, umidade e gás/VOCs, linha de base do MQ-3, variação relativa do sinal de gás, variação térmica da janela de análise e déficit de pressão de vapor (*Vapor Pressure Deficit* – VPD). A temperatura foi tratada como variável de risco e limitação, e não como valor-alvo garantido, devido à ausência de refrigeração ativa.

O controlador foi organizado como uma lógica híbrida baseada em estados, tendências e prioridades. Entre os estados considerados estiveram repouso, renovação periódica do ar, purga de gases/VOCs, alívio

térmico, limite térmico, recuperação de umidade, proteção contra umidade excessiva, descanso após ventilação e modo seguro. A definição do estado considerou a integridade dos sensores, a validade temporal das leituras, os limiares configurados e o histórico recente de acionamentos.

Foram definidos três modos principais de ventilação: desligado, exaustão superior e renovação completa. A exaustão superior foi utilizada para retirada de ar quente acumulado na parte superior da caixa, enquanto a renovação completa acionou simultaneamente as três ventoinhas para favorecer troca de ar e remoção de gases/VOCs. O umidificador foi acionado em situações de baixa umidade relativa, respeitando restrições para evitar conflito com ventilação ativa e desperdício de vapor.

Cada ciclo automático foi registrado no banco de dados, incluindo estado selecionado, prioridade, motivo da decisão, leituras utilizadas, tendências, linha de base de gás, VPD, alertas, limitações e decisões por atuador. Esses registros compuseram uma trilha de auditoria do experimento e permitiram relacionar as condições ambientais às ações executadas pelo sistema.

A execução dos testes foi realizada com o sistema em operação contínua. O compartimento com atuadores recebeu comandos automáticos conforme as leituras e regras definidas, enquanto o compartimento sem atuadores permaneceu como ambiente passivo de comparação. As leituras ambientais, estados dos atuadores, logs de automação e imagens foram registrados ao longo das validações, permitindo análise conjunta do microambiente, das decisões automáticas e da evolução visual dos frutos.

3.5 ANÁLISE DOS DADOS

A análise dos dados teve caráter descritivo, sem aplicação de testes estatísticos inferenciais, por se tratar de uma validação experimental em escala de protótipo. Foram considerados os registros de temperatura, umidade relativa, leitura de gás em ADC, instante da leitura, estados de atuadores, logs de automação e capturas das câmeras, todos persistidos no PostgreSQL e disponibilizados pela API.

As médias diárias de temperatura e umidade relativa foram calculadas a partir da soma dos registros válidos de cada variável em um determinado dia, dividida pela quantidade de coletas válidas no mesmo período e no respectivo compartimento experimental.

A primeira etapa consistiu na análise descritiva das séries temporais ambientais. Foram observados os históricos de temperatura, umi-

dade e gás nos compartimentos com e sem atuadores, com atenção a oscilações, picos, tendências e períodos de maior estabilidade. A leitura do MQ-3 foi analisada como sinal relativo, comparando sua variação com a linha de base do próprio compartimento, sem conversão para concentração absoluta de etileno.

A segunda etapa correspondeu à interpretação dos registros de automação. Os logs foram analisados em conjunto com as leituras que originaram cada decisão, verificando a coerência entre condição ambiental, estado selecionado, prioridade calculada e atuadores acionados. Essa análise permitiu avaliar se o sistema respondeu a situações de gás/VOCs elevados, umidade fora da faixa operacional, necessidade de renovação do ar e limitação térmica.

A terceira etapa incluiu a comparação entre o compartimento com atuadores e o compartimento sem atuadores. Essa comparação foi utilizada para observar diferenças no comportamento ambiental entre o ambiente submetido a controle assistido e o ambiente passivo. Como o protótipo não possui refrigeração ativa, a análise da temperatura considerou principalmente tendências de estabilização, redução de acúmulo de calor e identificação de limites de atuação, e não a manutenção absoluta de uma temperatura-alvo.

As imagens capturadas pelas ESP32-CAM foram tratadas como registro visual complementar. Elas permitiram acompanhar alterações externas dos frutos, como mudança de coloração e aparência geral, e relacioná-las aos dados ambientais registrados. Por não ter sido empregado processamento de imagem calibrado, a análise visual teve caráter qualitativo e auxiliar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos indicaram que o protótipo conseguiu integrar sensoriamento ambiental, comunicação MQTT, armazenamento em banco de dados, supervisão remota, registro visual e acionamento automático de atuadores. O sistema deixou de operar apenas como monitor de variáveis e passou a funcionar como uma plataforma experimental de controle ambiental assistido para a caixa experimental compartimentada de conservação de bananas.

Durante a validação do hardware, a substituição do T-OI Plus ESP32-C3 pelo módulo ESP32 com maior disponibilidade de pinos foi um resultado importante do processo de desenvolvimento. O ESP32-C3 per-

mitiu as primeiras validações de comunicação e leitura, mas sua limitação de portas dificultou a expansão do circuito quando sensores, relés e periféricos passaram a operar em conjunto. A troca para o ESP32 com 30 pinos reduziu a restrição de conexões, facilitou a organização elétrica e tornou o protótipo mais adequado à integração simultânea dos componentes.

Também foram observadas limitações relacionadas à alimentação dos atuadores. A alimentação inicial do módulo relé a partir do próprio microcontrolador provocou reinicializações durante o acionamento, indicando que a montagem não fornecia margem elétrica suficiente para as cargas envolvidas. A adoção de fonte externa de 12 V, conversor *step-down* para 5 V e separação entre alimentação lógica e alimentação dos atuadores melhorou a estabilidade operacional. Esse ajuste reforçou a importância de tratar a eletrônica de potência e a eletrônica de controle como partes distintas do protótipo.

A leitura do sensor MQ-3 foi utilizada como indicador relativo da variação de gases/VOCs no interior do compartimento monitorado. Como o sensor não é seletivo para etileno e pode sofrer influência de outros compostos, temperatura, umidade e condições de aquecimento, seus valores foram interpretados como tendência ambiental, e não como medição química específica.

Os dados armazenados mostraram que o sistema registrou continuamente leituras ambientais identificadas por compartimento e por sensor. O uso de backlog local no ESP32 aumentou a tolerância a falhas de conectividade, pois permitiu reenvio posterior de mensagens não transmitidas. Esse comportamento foi relevante para a qualidade da série temporal, principalmente em um experimento dependente de comunicação sem fio.

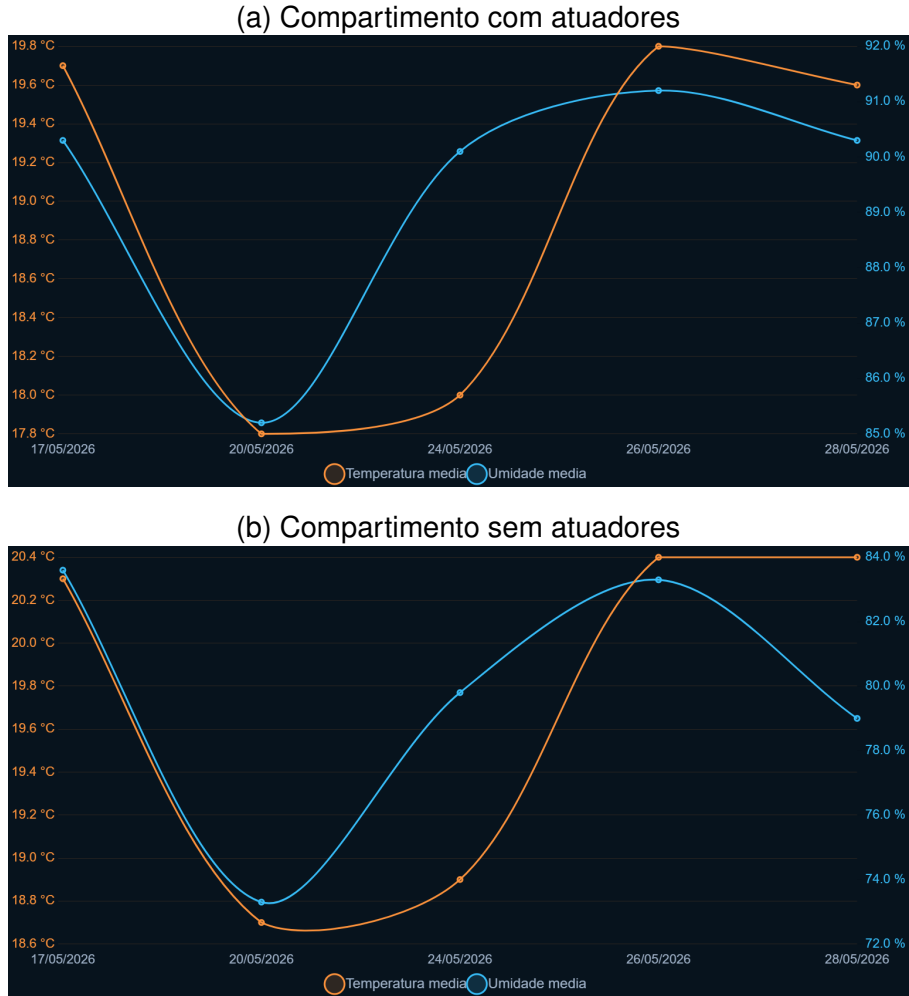
Os resultados da automação indicaram que o sistema conseguiu executar ciclos periódicos de decisão e registrar o contexto de cada ciclo. A lógica por estados permitiu diferenciar situações de repouso, renovação de ar, purga de gás/VOCs, alívio térmico, recuperação de umidade, proteção contra excesso de umidade e modo seguro. Essa abordagem tornou o controle mais adequado ao objetivo do estudo, pois evitou tratar temperatura, umidade e gás como variáveis independentes sem prioridade entre elas.

Esse resultado diferencia a proposta dos sistemas de monitoramento predominantemente passivos, como o de Silva (2024), pois o protótipo desenvolvido não se limitou à coleta e visualização das variáveis ambientais, incorporando também acionamento automático de atuadores. Em relação aos trabalhos de controle ativo analisados, como Rodrigues e Coe-

Iho (2022) e Andrade (2020), a contribuição deste estudo está na aplicação do controle ambiental assistido ao contexto de conservação pós-colheita de bananas, em escala de protótipo e com arquitetura IoT de baixo custo.

Na primeira validação experimental, a partir das leituras ambientais registradas pelo sistema, foram calculadas as médias de temperatura e umidade relativa nos dias 17/05, 20/05, 24/05, 26/05 e 28/05. A Figura 3 apresenta o comportamento médio observado nos compartimentos com e sem atuadores, permitindo comparar o ambiente submetido ao controle assistido com o ambiente passivo.

Figura 3 - Médias de temperatura e umidade na primeira validação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação entre os gráficos da Figura 3 indica que o compartimento com atuadores apresentou maior capacidade de manejo da umidade relativa ao longo dos dias analisados. Em relação à temperatura, observou-se uma diferença média pequena, porém favorável ao comparti-

mento com atuadores, com valores aproximadamente entre 0,6 °C e 0,9 °C inferiores em alguns dias. Apesar disso, essa variação deve ser interpretada como efeito limitado da ventilação e da renovação do ar, e não como controle térmico efetivo, uma vez que o protótipo não possui refrigeração ativa. Dessa forma, os resultados indicam que o sistema foi mais efetivo no manejo da umidade relativa e na renovação do ar do que na redução direta da temperatura.

Em relação à temperatura, os testes confirmaram essa limitação: ventiladores e exaustor favoreceram a circulação e a retirada de ar quente acumulado, mas não produziram refrigeração ativa. Quando a troca de ar não resultava em queda térmica, o sistema reconhecia o limite de atuação e evitava manter ventilação contínua sem ganho efetivo.

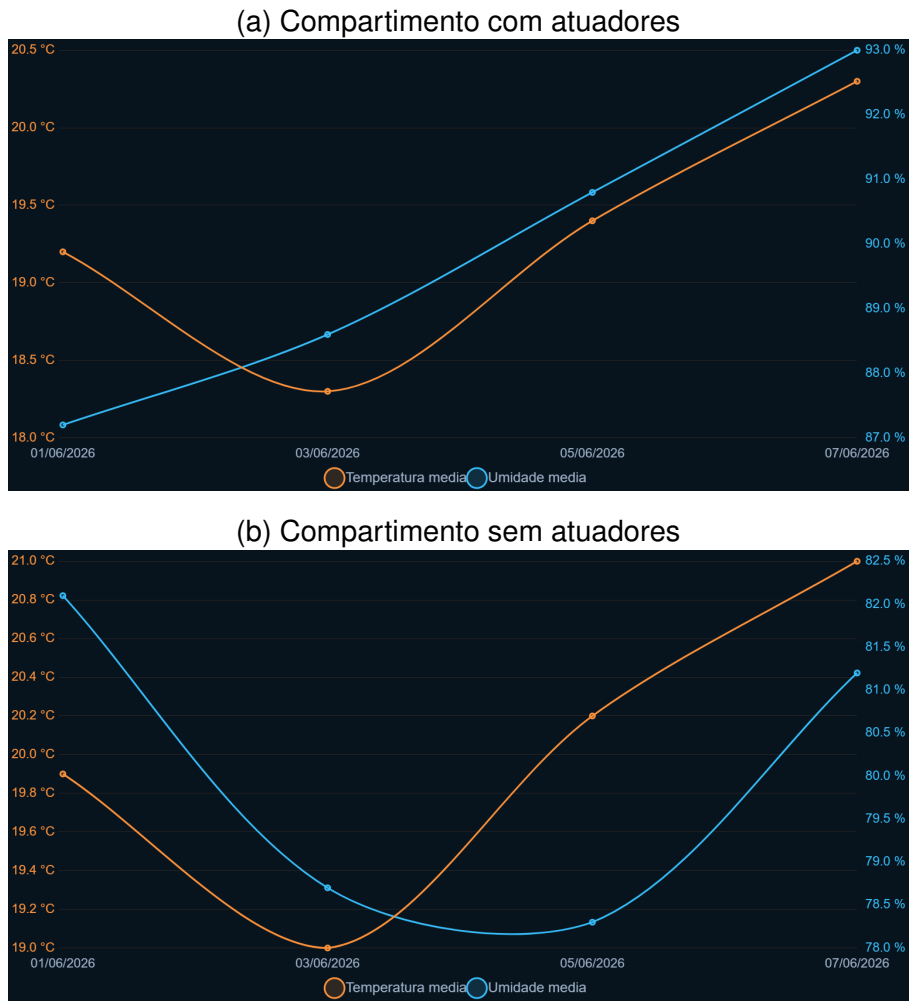
A automação mostrou maior pertinência nas ações de renovação do ar, remoção de gases/VOCs e manejo da umidade relativa. A renovação completa, com acionamento dos três ventiladores, foi utilizada para favorecer troca de ar quando havia acúmulo de voláteis ou necessidade periódica de circulação. A exaustão superior atuou como alívio térmico moderado, especialmente para reduzir acúmulo de ar quente na região superior da caixa. O umidificador, por sua vez, foi acionado em condições de baixa umidade e com restrições para evitar desperdício de vapor durante ventilação ativa.

A presença de tempos mínimos, duração máxima de ciclos e descanso entre ventilações contribuiu para reduzir chaveamentos excessivos. Essa decisão técnica foi importante porque atuadores acionados em intervalos muito curtos poderiam gerar instabilidade elétrica, desgaste mecânico e pouca efetividade ambiental. Desse modo, a resposta do sistema passou a considerar não apenas a leitura instantânea, mas também o histórico recente e a eficiência esperada da ação.

A segunda validação experimental foi conduzida com a mesma variedade de banana utilizada na primeira etapa, iniciando-se em 01/06/2026. Essa nova massa de teste teve como finalidade observar novamente o comportamento do protótipo em uma condição experimental semelhante, permitindo comparar os compartimentos com e sem atuadores a partir de novos registros ambientais e visuais.

Para essa etapa, foram selecionados os dias 01/06, 03/06, 05/06 e 07/06 para cálculo das médias de temperatura e umidade relativa. A Figura 4 apresenta os resultados médios obtidos na segunda validação experimental.

Figura 4 - Médias de temperatura e umidade na segunda validação.



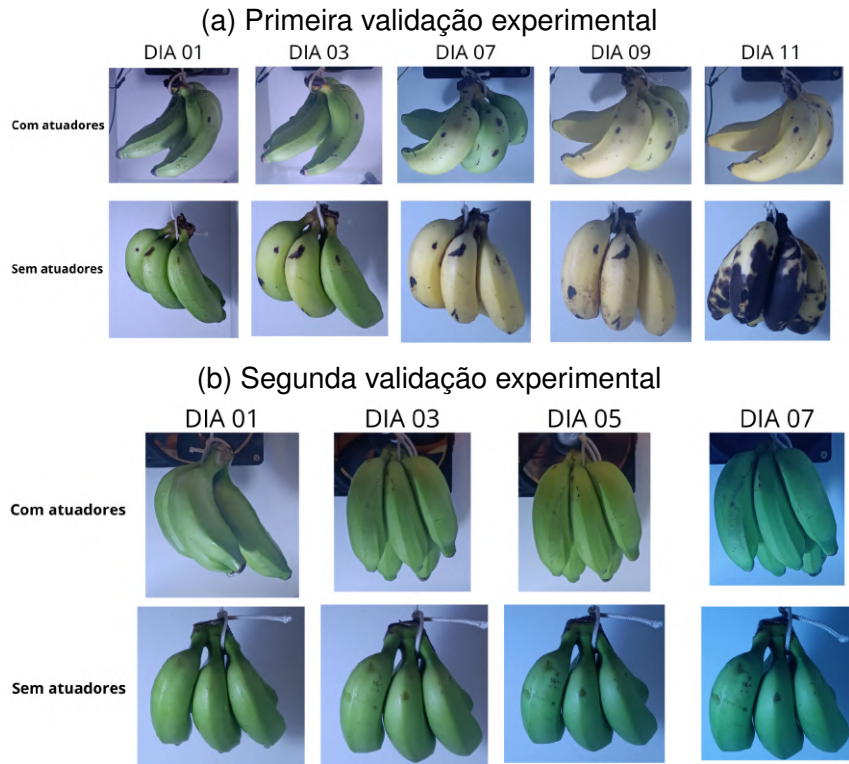
Fonte: Elaborado pelo autor.

A comparação entre os gráficos da Figura 4 indica que, na segunda validação, o comportamento geral observado na primeira etapa se manteve parcialmente. Em relação à temperatura, os dois compartimentos apresentaram elevação ao final do período, reforçando a limitação do protótipo quanto ao controle térmico, uma vez que não há refrigeração ativa. Por outro lado, o compartimento com atuadores apresentou comportamento mais favorável no manejo da umidade relativa, mantendo valores superiores aos observados no compartimento sem atuadores nos dias analisados. Assim, os dados da segunda validação reforçam a viabilidade funcional do sistema para monitoramento, registro e atuação ambiental assistida, especialmente no manejo da umidade e na renovação do ar.

Além das métricas ambientais, foram realizados registros fotográficos externos com um smartphone Xiaomi Redmi Note 11 Pro, com a finalidade de documentar visualmente a evolução dos frutos nas duas vali-

dações experimentais. Esses registros não fizeram parte do fluxo automatizado das ESP32-CAM, mas foram utilizados como apoio qualitativo para comparar os compartimentos com e sem atuadores, conforme apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Evolução visual das bananas na primeira e segunda validação experimental



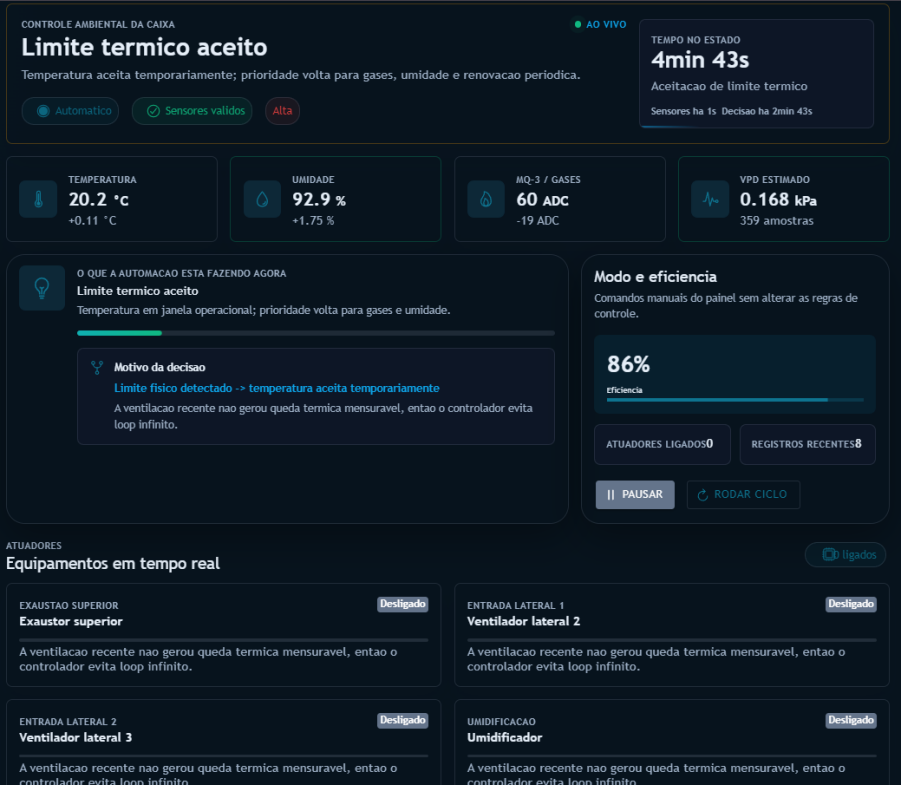
Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme observado na Figura 5, os registros fotográficos externos permitem acompanhar alterações de coloração e escurecimento da casca nos compartimentos com e sem atuadores ao longo das validações. Na primeira validação experimental, realizada por um período mais prolongado, as diferenças visuais tornaram-se mais perceptíveis, especialmente pela maior evolução do amadurecimento e do escurecimento da casca ao longo dos dias. Na segunda validação, por ter sido acompanhada por um intervalo menor, as alterações visuais entre os compartimentos foram menos evidentes, indicando que seria necessário um período adicional de observação para avaliar com maior clareza possíveis diferenças na aparência dos frutos. Assim, essa comparação foi utilizada como evidência qualitativa complementar à análise dos dados ambientais, sem substituir métricas instrumentais de maturação, como análise colorimétrica, firmeza da polpa ou medição calibrada de etileno.

Do ponto de vista do software, a centralização da automação no backend mostrou-se adequada ao protótipo, pois permitiu ajustar limiares, tempos, prioridades e estados sem intervenção direta no firmware. Além disso, os logs gerados registraram leituras, tendências, pontuações, alertas e decisões, compondo uma trilha de auditoria do processo de controle.

A interface web desenvolvida permitiu acompanhar o estado da automação, os dados ambientais e os registros associados ao funcionamento do protótipo. A Figura 6 apresenta a tela de automação utilizada durante o acompanhamento experimental.

Figura 6 - Interface web de supervisão e automação do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

As limitações observadas estão relacionadas principalmente ao caráter de baixo custo do sistema. A ausência de refrigeração ativa impede controle absoluto da temperatura; o MQ-3 não mede etileno de forma seletiva; a atuação por ventilação depende das condições externas; e as câmeras fornecem acompanhamento visual qualitativo, não análise automática calibrada do amadurecimento. Assim, os resultados devem ser interpretados considerando o protótipo como ferramenta de monitoramento, mitigação e apoio à conservação pós-colheita, e não como equipamento definitivo de controle climático.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar funcionalmente um protótipo de sistema IoT para monitoramento e controle ambiental assistido aplicado à conservação pós-colheita de bananas. De modo geral, o objetivo foi atingido, uma vez que o sistema integrou sensores, atuadores, câmeras, comunicação MQTT, backend, banco de dados e interface de supervisão em uma caixa experimental compartimentada, sendo avaliado em duas validações experimentais.

Os resultados demonstraram a viabilidade funcional e técnica da proposta em escala de protótipo. O sistema permitiu acompanhar variáveis ambientais, registrar decisões automáticas e atuar sobre ventilação, renovação do ar, gases/VOCs e umidade relativa. A comparação entre o compartimento com atuadores e o compartimento sem atuadores indicou que a solução apresentou maior pertinência no manejo da umidade relativa e na renovação do ar, enquanto o controle de temperatura permaneceu limitado pela ausência de refrigeração ativa.

Como limitações, destaca-se que o sensor MQ-3 foi utilizado apenas como indicador relativo de gases/VOCs, sem medição seletiva de etileno, e que a análise visual dos frutos teve caráter qualitativo, sem aplicação de métricas instrumentais de maturação. Além disso, as validações foram realizadas em escala reduzida, com número limitado de amostras e sem aplicação de testes estatísticos inferenciais. Assim, os resultados não devem ser interpretados como comprovação definitiva de redução de perdas pós-colheita, mas como evidência da viabilidade funcional do protótipo.

Para trabalhos futuros, recomenda-se ampliar o número de amostras e repetições experimentais, utilizar sensores calibrados para gases associados ao amadurecimento, incorporar mecanismos de refrigeração ativa e aplicar métodos quantitativos de avaliação dos frutos, como análise colorimétrica, firmeza da polpa e processamento de imagens. Essas melhorias podem permitir uma avaliação mais precisa da efetividade do sistema na conservação pós-colheita e na redução do amadurecimento das bananas.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Os autores declaram que ferramentas de inteligência artificial generativa foram utilizadas exclusivamente como apoio auxiliar à elaboração deste trabalho, incluindo assistência na revisão linguística, estruturação textual e organização de ideias. Nenhuma ferramenta de IA foi utilizada para

substituição da autoria intelectual, análise científica, interpretação dos resultados ou tomada de decisões acadêmicas. A responsabilidade integral pelo conteúdo, originalidade, veracidade das informações e conformidade com os princípios de integridade científica permanece integralmente atribuída aos autores.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, C. M. d. **Controle de ambiente automatizado para cultivo de *Agaricus bisporus***. 80 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciência da Computação)) — Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2020.

ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. **The internet of things: A survey**. *Computer Networks*, v. 54, n. 15, p. 2787–2805. 2010.

DANTAS, Y. S. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento Ambiental com ESP32 e Sensores de Gás e Umidade integrado ao Blynk**. Campina Grande, PB: [s.n.], 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

Embrapa. **Pós-colheita**. 2021. Agência de Informação Tecnológica. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/banana/pos-producao/pos-colheita>>. Acesso em: 06 de set. de 2025.

FAO. **The State of Food and Agriculture 2019: Moving forward on food loss and waste reduction**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations. ISBN 978-92-5-131789-1. 2019.

IBGE. **IBGE Explica - Banana**. 2023. <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/banana/br>>. Acesso em: 28 ago. 2025.

INABA, A. et al. **Differential feedback regulation of ethylene biosynthesis in pulp and peel tissues of banana fruit**. *Journal of Experimental Botany*, v. 58, n. 5, p. 1047–1057. 2007, Disponível em: <<https://doi.org/10.1093/jxb/erl265>>. Acesso em: 07 de jun. de 2026.

KADER, A. A. (Ed.). **Postharvest technology of horticultural crops**. 3. ed. Oakland: University of California, Agriculture and Natural Resources. 535 p. 2002. Publication 3311.

RODRIGUES, M. C.; COELHO, M. S. **Controle pi e on-off para ambiente de cultivo de cogumelos**. *Revista Acadêmica - Ensino de Ciências e Tecnologias*, v. 10. 2022, Disponível em: <<https://intranet.cbt.ifsp.edu.br/qualif/volume10/artigo10.pdf>>. Acesso em: 23 de nov. de 2025.

SILVA, J. D. R. d. **Sistema de IoT para Monitoramento da Maturação de Frutas por Cor e Gás Etileno**. Manaus, AM: [s.n.], 2024. Monografia

de Graduação (Engenharia da Computação) – Faculdade de Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

SOUZA, I. A. d.; PEREIRA, H. d. S.; SOUSA, A. E. D. d. **Avaliação das perdas de bananas produzidas em rio preto da eva, amazonas, brasil.** Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, Maringá, v. 14, n. 3, p. 625–638. ISSN 2176-9168. 2021.

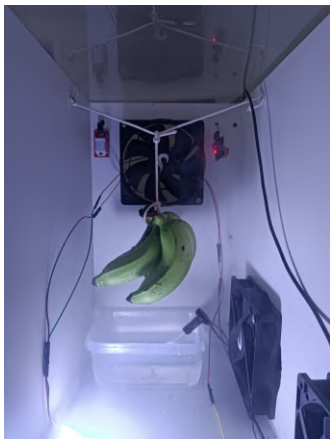
TZOUNIS, A. et al. **Internet of things in agriculture, recent advances and future challenges.** Biosystems Engineering, v. 164, p. 31–48. 2017.

APÊNDICE A – REGISTRO VISUAL DA PRIMEIRA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Figura A.1 - Registro visual das bananas em 17 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.

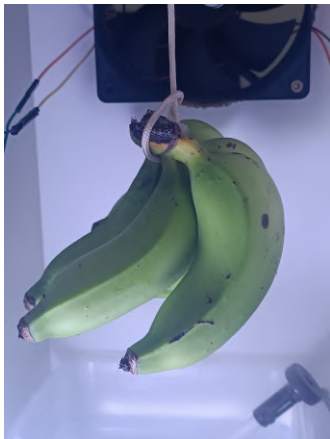


Com atuadores

Figura A.2 - Registro visual das bananas em 20 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

Figura A.3 - Registro visual das bananas em 21 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

Figura A.4 - Registro visual das bananas em 22 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.

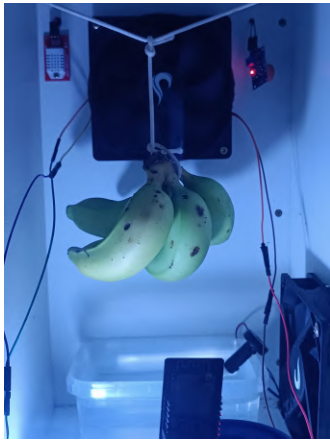


Com atuadores

Figura A.5 - Registro visual das bananas em 23 de maio.

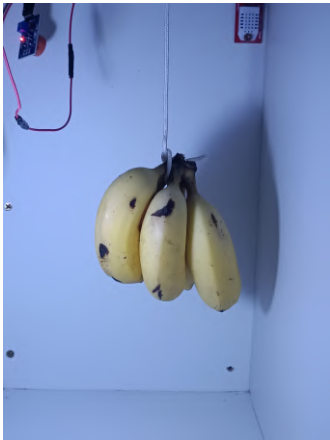


Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.

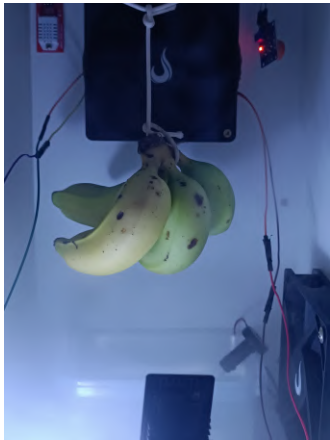


Com atuadores

Figura A.6 - Registro visual das bananas em 24 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.

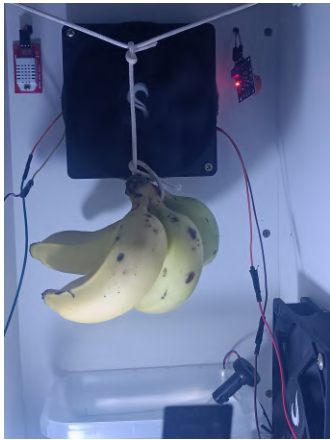


Com atuadores

Figura A.7 - Registro visual das bananas em 25 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

Figura A.8 - Registro visual das bananas em 26 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

Figura A.9 - Registro visual das bananas em 27 de maio.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

Figura A.10 - Registro visual das bananas em 28 de maio.



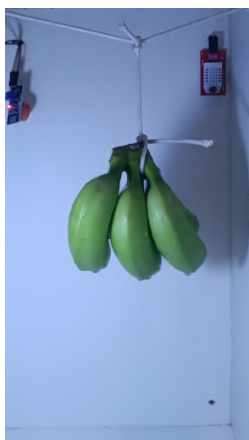
Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

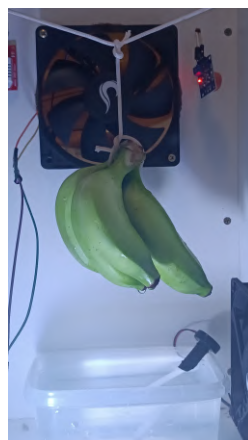
APÊNDICE B – REGISTRO VISUAL DA SEGUNDA VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

Figura B.1 - Registro visual das bananas em 01 de junho.



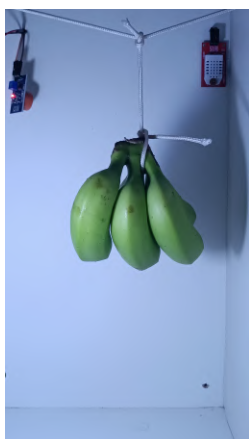
Sem atuadores

Fonte: Elaborado pelo autor.



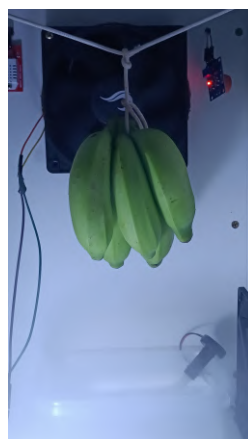
Com atuadores

Figura B.2 - Registro visual das bananas em 02 de junho.



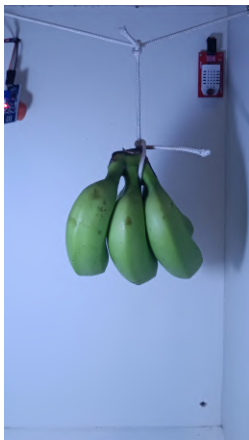
Sem atuadores

Fonte: Elaborado pelo autor.



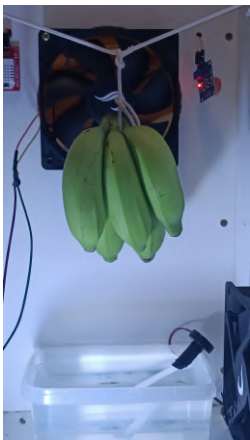
Com atuadores

Figura B.3 - Registro visual das bananas em 03 de junho.



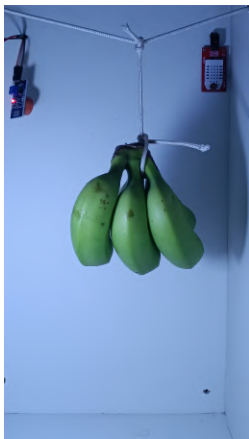
Sem atuadores

Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

Figura B.4 - Registro visual das bananas em 04 de junho.



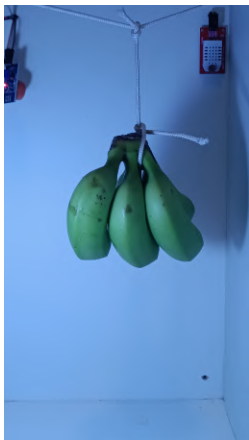
Sem atuadores

Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores

Figura B.5 - Registro visual das bananas em 05 de junho.



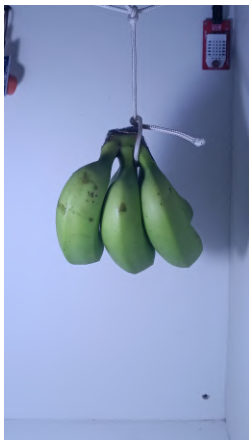
Sem atuadores

Fonte: Elaborado pelo autor.

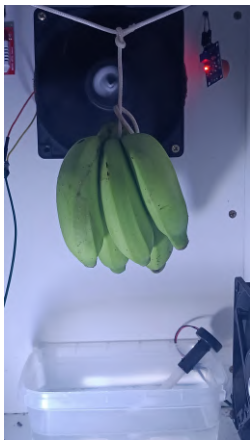


Com atuadores

Figura B.6 - Registro visual das bananas em 06 de junho.

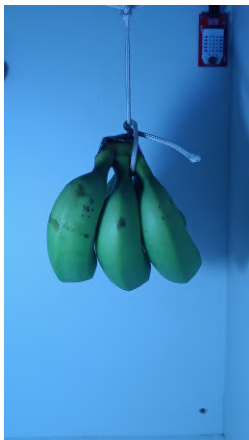


Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.

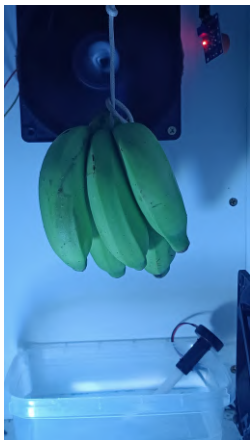


Com atuadores

Figura B.7 - Registro visual das bananas em 07 de junho.



Sem atuadores
Fonte: Elaborado pelo autor.



Com atuadores