



BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**AMBIENTE IOT DE EXPERIMENTAÇÃO EM AGRICULTURA  
VERTICAL *INDOOR***

JHONATAS CORREIA DOS SANTOS MORAES

Rio Verde, GO

2026



INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS RIO VERDE  
BACHAREL EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

**AMBIENTE IOT DE EXPERIMENTAÇÃO EM AGRICULTURA  
VERTICAL *INDOOR***

JHONATAS CORREIA DOS SANTOS MORAES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Leonel Diógenes Carvalhaes Alvarenga  
Coorientador: Rafael Carvalho de Mendonça  
INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS  
RIO VERDE

Rio Verde, GO

JUNHO, 2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

M828a Moraes, Jhonatas Correia dos Santos  
          AMBIENTE IoT DE EXPERIMENTAÇÃO EM  
          AGRICULTURA VERTICAL INDOOR / Jhonatas Correia dos  
          Santos Moraes. Rio Verde 2026.

64f. il.

Orientador: Prof. Me. Leonel Diógenes Carvalhaes.

Coorientador: Prof. Me. Rafael Carvalho de Mendonça.

Monografia (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de  
0219201 - Bacharelado em Ciência da Computação - Integral -  
Rio Verde (Campus Rio Verde).

1. Agricultura Vertical. 2. Internet das Coisas. 3. Agricultura 4.0.  
4. Automação. I. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

## TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÃO TÉCNICA NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

**Repositório Institucional do IF Goiano - RIIF Goiano Sistema Integrado de Bibliotecas**  
**- Profissional de Educação do IF Goiano -**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, e manual sobre a Produção Técnica, publicado pela DAV/CAPES/MEC\*, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada eletronicamente abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

### Identificação da Produção Técnica – DAV/CAPES

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Editoria   | <input type="checkbox"/> Material Didático                 |
| <input type="checkbox"/> Curso de Formação Profissional                   | <input type="checkbox"/> Projetos de Extensão à Comunidade |
| <input type="checkbox"/> Relatório Técnico Conclusivo                     | <input type="checkbox"/> Atividade Técnica/Tecnológica     |
| <input type="checkbox"/> Disseminação do Conhecimento Técnico/Tecnológico | <input type="checkbox"/> Produto Bibliográfico             |
- Outras Produções Técnicas - Tipo: TCC (Graduação)

Nome Completo do Autor/a: Jhonatas Correia dos Santos Moraes

Matrícula: 2016102192010323

Título do Trabalho: AMBIENTE IOT DE EXPERIMENTAÇÃO EM AGRICULTURA VERTICAL INDOOR

### Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial:  Não  Sim

Justifique: \_\_\_\_\_

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 30 / 06 / 2026

O documento está sujeito a registro de patente?  Sim  Não

O documento pode vir a ser publicado como livro e/ou artigo?  Sim  Não

## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a docente e/ou autor/a declara que:

1 - o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;

2 - obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;

3 - cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 30 de junho de 2026.

*(Assinado Eletronicamente)*

Jhonatas Correia dos Santos Moraes (Autor)

*(Assinado Eletronicamente)*

Leonel Diógenes Carvalhaes Alvarenga (Orientador)

1587264

(Assinatura do Docente, Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais)

Documento assinado eletronicamente por:

- **Leonel Diogenes Carvalhaes Alvarenga, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 30/06/2026 17:02:58.
- **Jhonatas Correia dos Santos Moraes, 2016102192010323 - Discente**, em 30/06/2026 17:04:23.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 836400

**Código de Autenticação:** d3ea92e264



## Regulamento de Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

### ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Aos 23 dias do mês de Junho de dois mil e vinte e seis, às 15h00, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: Prof. Me. Leonel Diógenes Carvalhaes Alvarenga (orientador), Prof. Dr. Márcio da Silva Vilela e Profa. Dra. Paula Sperotto Alberto Faria, para examinar o Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “AMBIENTE IOT DE EXPERIMENTAÇÃO EM AGRICULTURA VERTICAL INDOOR”, de Jhonatas Correia dos Santos Moraes, estudante do curso de Ciência da Computação do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº 2016102192010323.

A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela APROVAÇÃO do estudante.

Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Rio Verde, 23 de Junho de 2026.

*(Assinado eletronicamente)*

Leonel Diógenes Carvalhaes Alvarenga  
Orientador(a)

*(Assinado eletronicamente)*

Márcio da Silva Vilela  
Membro da Banca Examinadora

*(Assinado eletronicamente)*

Paula Sperotto Alberto Faria  
Membro da Banca Examinadora

Documento assinado eletronicamente por:

- **Leonel Diogenes Carvalhaes Alvarenga, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 23/06/2026 16:43:15.
- **Marcio da Silva Vilela, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 23/06/2026 16:45:38.
- **Paula Sperotto Alberto Faria, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO** , em 23/06/2026 16:46:15.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 09/06/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 828212

**Código de Autenticação:** 067d68bfbf



Dedico esse trabalho a minha família que tanto tem se esforçado para que eu tenha uma educação de qualidade!

## AGRADECIMENTOS

Quero agradecer à minha esposa, Jéssica Silva Medeiros, pelo apoio incondicional, incentivo constante, companheirismo e por todo o amor que tem me dado ao longo de toda a nossa vida em comunhão.

Agradeço também ao meu pai e à minha mãe, por toda orientação, dedicação, valores, ensinamentos que me proporcionaram uma base para minha formação pessoal e acadêmica, pelos esforços realizados para me oferecer um ensino de qualidade.

Agradeço aos meus avós que não mediram esforços ao me apoiar nos momentos em que precisei deles.

À minha irmã, que me possibilitou ser alguém responsável, pela parceria, pelo amor a mim oferecido.

Aos meus tios e tias que desde que me entendo por gente sempre me deram apoio e incentivos nos momentos em que precisei.

Agradeço aos professores da vida acadêmica pela valiosa contribuição à minha formação. Em especial, registro minha gratidão ao Professor Me. Leonel Diógenes Carvalhaes Alvarenga pela orientação neste trabalho, assim como ao Prof. Me. Rafael Carvalho de Mendonça, que, na condição de coorientador, colaborou de forma significativa no desenvolvimento deste estudo, oferecendo suporte e orientação. Agradeço também aos representantes do Laboratório de Fisiologia Vegetal pela disponibilização do espaço e dos suprimentos necessários à execução deste trabalho.

Agradeço ao Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde pelo suporte oferecido durante o desenvolvimento deste trabalho.

E, claro, agradeço a Deus por todas as bênçãos que tem me dado, principalmente pela recente bênção de ser pai!

## RESUMO

MORAES, Jhonatas C.. **AMBIENTE IoT DE EXPERIMENTAÇÃO EM AGRICULTURA VERTICAL INDOOR**. JUNHO, 2026. 48 f. Monografia – (Curso de Bacharelado em Ciência da Computação), Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. Rio Verde, GO.

O crescente desafio de suprir a demanda global por alimentos de forma sustentável e eficiente tem impulsionado a adoção de técnicas inovadoras, como a agricultura vertical e a Agricultura 4.0. Nesse contexto, embora a agricultura vertical apresente avanços relevantes quanto ao uso eficiente de recursos e à possibilidade de produção em ambientes controlados e próximos aos centros urbanos, ainda se observa necessidade de monitorar, controlar e prever variações e erros nos parâmetros de cultivo. Assim, permanece uma lacuna relacionada ao desenvolvimento de arquiteturas IoT integradas, capazes de reunir monitoramento ambiental, automação, rastreabilidade e suporte à condução experimental de forma interconectada. Este trabalho propõe um sistema tecnológico para monitorar o ambiente de cultivo indoor, automatizar equipamentos e permitir o acompanhamento remoto dos experimentos. Como solução, foi desenvolvido um ambiente de agricultura vertical indoor baseado em IoT, utilizando microcontroladores, sensores de temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade detectada por LDR, além de atuadores responsáveis pela fertirrigação, iluminação artificial e ventilação. O sistema foi integrado à Arduino Cloud para visualização, armazenamento e exportação dos dados, bem como à *ESP32-CAM* para registro periódico de imagens. A validação operacional foi realizada durante 32 dias de cultivo experimental de morango, considerando registros de temperatura, umidade, luminosidade, notificações operacionais e acompanhamento visual. Os resultados indicaram funcionamento adequado da arquitetura proposta, permitindo identificar variações microclimáticas entre câmaras e documentar a operação do sistema. **Como não foram coletadas variáveis agrônomicas quantitativas suficientes, o trabalho não comprova aumento de produtividade vegetal**, mas valida uma plataforma tecnológica funcional para apoiar experimentos futuros de eficiência produtiva, controle ambiental e automação em agricultura vertical indoor.

**Palavras-chave:** Agricultura Vertical, Internet das Coisas, Agricultura 4.0, Automação.

## ABSTRACT

MORAES, Jhonatas C.. IoT Experimental Environment for Indoor Vertical Farming. JUNHO, 2026. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Ciência da Computação, Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde. Rio Verde, GO, JUNHO, 2026.

The growing challenge of meeting the global demand for food in a sustainable and efficient manner has driven the adoption of innovative techniques, such as vertical farming and Agriculture 4.0. In this context, although vertical farming has shown relevant advances in terms of efficient resource use and the possibility of production in controlled environments close to urban centers, there is still a need to monitor, control, and predict variations and failures in cultivation parameters. Thus, a gap remains regarding the development of integrated IoT architectures capable of combining environmental monitoring, automation, traceability, and support for experimental management in an interconnected way. This work proposes a technological system to monitor the indoor cultivation environment, automate equipment, and enable the remote monitoring of experiments. As a solution, an IoT-based indoor vertical farming environment was developed using microcontrollers, temperature, relative humidity, and luminosity sensors detected by LDR, in addition to actuators responsible for fertigation, artificial lighting, and ventilation. The system was integrated with Arduino Cloud for data visualization, storage, and export, as well as with an *ESP32-CAM* for periodic image recording. Operational validation was carried out during 32 days of experimental strawberry cultivation, considering records of temperature, humidity, luminosity, operational notifications, and visual monitoring. The results indicated the proper functioning of the proposed architecture, allowing the identification of microclimatic variations between chambers and the documentation of system operation. **As sufficient quantitative agronomic variables were not collected, this study does not demonstrate increased plant productivity**, but it validates a functional technological platform to support future experiments on productive efficiency, environmental control, and automation in indoor vertical farming.

**Keywords:** Vertical Farming, Internet of Things, Agriculture 4.0, Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Agricultura 4.0 . . . . .	3
Figura 2 – Representação de um Sistema de Aeroponia . . . . .	4
Figura 3 – Câmaras de cultivo com cinco compartimentos destinadas ao cultivo indoor. . . . .	8
Figura 4 – Módulo ESP8266 protegido por caixa produzida por impressão 3D. . .	9
Figura 5 – Visão interna da caixa plastica adaptada com sistema de nebulização para cultivo de plantas em sistemas de aeroponia. . . . .	10
Figura 6 – Circuito principal com ESP32 instalado na estrutura de cultivo indoor.	11
Figura 7 – Microcontrolador ESP32 utilizado como unidade central do sistema. . .	12
Figura 8 – Display LCD TFT 128x168 utilizado para visualização local das informações do sistema. . . . .	13
Figura 9 – Esquemático do módulo ESP8266 com sensores e saída de acionamento.	14
Figura 10 – Compartimento de cultivo com iluminação artificial. . . . .	15
Figura 11 – Fluxograma do software embarcado do sistema. . . . .	17
Figura 12 – Dashboard da Arduino Cloud em ambiente web. . . . .	19
Figura 13 – Dashboard da Arduino Cloud em aplicativo móvel. . . . .	20
Figura 14 – Temperatura média diária nas câmaras de cultivo. . . . .	27
Figura 15 – Umidade relativa média diária nas câmaras de cultivo. . . . .	28
Figura 16 – Distribuição da temperatura nas câmaras de cultivo . . . . .	28
Figura 17 – Distribuição da umidade relativa nas câmaras de cultivo. . . . .	29
Figura 18 – Acompanhamento visual do cultivo de morango, com imagens capturadas por <i>ESP32-CAM</i> . . . . .	33
Figura 19 – Experimento complementar com cultivo de alface, com imagem capturada por <i>ESP32-CAM</i> . . . . .	34
Figura 20 – Exemplo de notificação em aplicativo Android para indicação de erro no sistema. (Registro captado fora do período de validação operacional).	35
Figura 21 – Exemplo de notificação em aplicativo Android referente ao estado de conexão com a internet. . . . .	36

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Camadas da arquitetura computacional do sistema IoT . . . . .	11
Tabela 2 – Síntese da validação operacional das funções do sistema . . . . .	23
Tabela 3 – Indicadores de desempenho operacional considerados na validação do sistema . . . . .	25
Tabela 4 – Estatísticas descritivas de temperatura e umidade nas câmaras de cultivo	26
Tabela 5 – Síntese da integridade dos dados ambientais analisados . . . . .	30
Tabela 6 – Registros de luminosidade detectados pelos sensores LDR nas câmaras de cultivo entre 07/05/2025 e 07/06/2025 . . . . .	31

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IoT	Internet das Coisas
LED	Light Emitting Diode
ESP32	Espressif Systems 32
ESP8266	Espressif Systems 8266
DHT22	Digital Humidity and Temperature 22
LDR	Light Dependent Resistor
NTP	Network Time Protocol
CE/EC	Condutividade Elétrica
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CLP	Controlador Lógico Programável

## LISTA DE ALGORITMOS

1	Controle dos relés do sistema. . . . .	18
---	--	----

## SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivos específicos	2
<b>2 – REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>3</b>
2.1 Agricultura 4.0	3
2.2 Internet das Coisas	4
2.3 Dispositivos de automação e monitoramento	5
2.4 Monitoramento Automatizado na Agricultura Vertical	6
2.5 Sensoriamento Agrícola	6
<b>3 – MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>8</b>
3.1 Classificação da pesquisa	8
3.2 Câmaras de cultivo para agricultura vertical	8
3.3 Sistema de irrigação	9
3.4 Arquitetura do sistema de controle e monitoramento	10
3.4.1 Sistema IoT de sensoriamento	12
3.4.2 Sistema de monitoramento visual	14
3.4.3 Iluminação controlada	15
3.5 Sistema integrado de controle e monitoramento	16
3.5.1 Controle manual e retorno automático	19
3.6 Interface em nuvem para interação e visualização	19
3.7 Coleta, tratamento e análise dos dados	20
3.8 Procedimentos do caso de uso experimental com cultivo de morango	21
<b>4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>23</b>
4.1 Validação operacional da arquitetura IoT	23
4.2 Desempenho dos atuadores e automação	24
4.3 Monitoramento ambiental das câmaras de cultivo	26
4.4 Desempenho do cultivo experimental de morango	32
4.5 Demonstração complementar de aplicabilidade em cultivo de alface	33
4.6 Notificações e acompanhamento remoto	34
4.7 Limitações do sistema e melhorias futuras	36
<b>5 – CONCLUSÃO</b>	<b>38</b>
<b>Referências</b>	<b>39</b>
<b>Apêndices</b>	<b>41</b>
<b>APÊNDICE A – Código-fonte completo do ESP32</b>	<b>42</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A produção de alimentos figura entre os principais desafios da humanidade e tende a se intensificar nas próximas décadas. Conforme Macedo e Júnior (2017), projeções indicam que a população mundial deve alcançar cerca de 9,7 bilhões de pessoas até 2050, o que exigirá um aumento expressivo e contínuo da oferta de alimentos. Mais do que uma questão de volume de produção, o desafio contemporâneo está em assegurar sistemas produtivos capazes de operar de forma estável e previsível, reduzindo a dependência das condições naturais do ambiente. As mudanças climáticas têm intensificado a frequência e a severidade de eventos adversos, como secas, ondas de calor, chuvas irregulares e variações bruscas de temperatura, que comprometem a produtividade da agricultura tradicional, fortemente condicionada ao solo, ao clima e à sazonalidade (DESTEFANI et al., 2025).

Nesse cenário, a agricultura vertical desponta como uma abordagem inovadora, ao cultivar plantas em camadas, em ambientes protegidos, em vez de grandes extensões de terra. Esse modelo otimiza o uso do espaço **disponível**, emprega os recursos naturais com maior eficiência, reduz o consumo de água e viabiliza a produção em áreas urbanas, mais próximas dos consumidores.

A integração da Internet das Coisas (IoT) tem sido um dos principais impulsores da Agricultura 4.0 — também chamada de agricultura digital ou inteligente —, baseada na incorporação de tecnologias de ponta para aprimorar a gestão e a produção no campo. Com o uso de dados em tempo real, é possível monitorar e controlar as etapas do cultivo, identificar falhas precocemente e adotar manutenção preditiva, reduzindo custos, perdas operacionais e a necessidade de intervenção humana. Esse último aspecto é especialmente relevante em ambientes de pesquisa científica, nos quais interferências externas podem comprometer a precisão dos resultados experimentais.

Apesar desses avanços, a **literatura recente ainda evidencia** a carência de sistemas integrados para monitoramento e controle do ambiente de cultivo. Trabalhos como os de Sabry (2021), Lima (2022) e Franca (2022) abordam aspectos específicos, como iluminação, hidroponia ou aeroponia, mas não exploram arquiteturas IoT robustas e interconectadas para a condução experimental automatizada.

Diante disso, este Trabalho de Conclusão de Curso visa desenvolver um **equipamento** baseado em arquitetura IoT integrada, voltado à pesquisa científica em agricultura vertical indoor, capaz de apoiar experimentos com diferentes espécies vegetais por meio da interconexão de microcontroladores ESP32 e ESP8266, sensores, atuadores e uma plataforma em nuvem. Diferentemente de soluções convencionais, o sistema registra e reporta eventos operacionais — como alterações de conectividade, mudanças de estado dos atuadores e ausência de luminosidade nos compartimentos —, favorecendo a autonomia operacional, a rastreabilidade e a reprodutibilidade dos experimentos, e evidenciando como a integração entre agricultura vertical e Internet das Coisas pode contribuir para práticas agrícolas mais sustentáveis, inteligentes e alinhadas à Agricultura 4.0.

## 1.1 Objetivo geral

Desenvolver e validar operacionalmente uma arquitetura IoT para monitoramento, automação e rastreabilidade de um ambiente de agricultura vertical indoor, voltado ao apoio de experimentos científicos em condições controladas de cultivo.

## 1.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- construir uma estrutura física modular com compartimentos de cultivo vertical;
- integrar sensores de temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade detectada por LDR;
- automatizar atuadores associados à fertirrigação, iluminação artificial e ventilação dos compartimentos;
- disponibilizar dados ambientais e operacionais em plataforma em nuvem;
- registrar imagens periódicas dos compartimentos por meio de *ESP32-CAM*;
- avaliar a operação do sistema em um cultivo experimental de morango;
- identificar limitações técnicas e possibilidades de melhoria para pesquisas futuras.

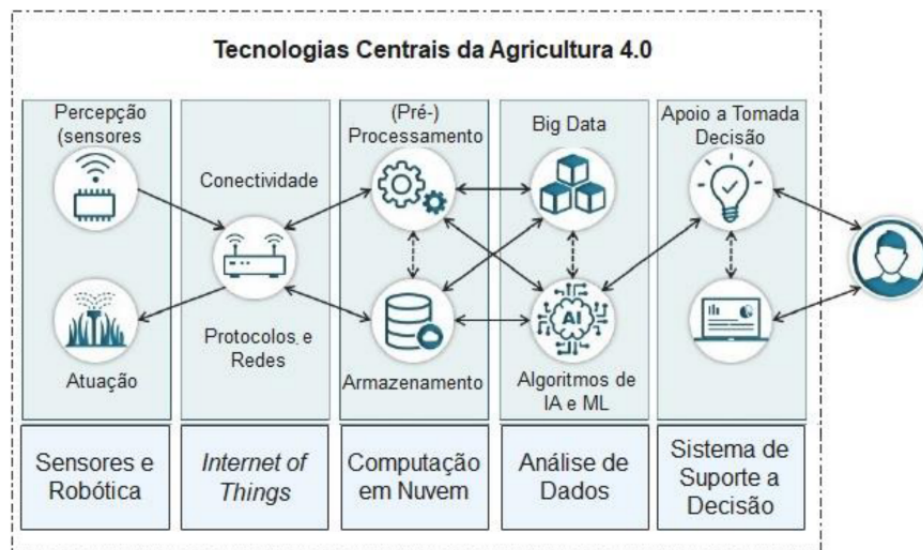
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Agricultura 4.0

A Agricultura 4.0 pode ser considerada a evolução da Agricultura de Precisão com uso de tecnologias da Indústria 4.0, buscando uma agricultura autônoma, com abastecimento confiável dos alimentos, uso de sensores e com fornecimento de informações para que o agricultor usuário dos sistemas possa ter apoio na tomada de decisão e a força impulsionadora é a necessidade do aumento de produção e eficiência nos processos, qualidade e redução dos impactos ambientais (PLETSCH; STENGER; SEHNEM, 2025).

As tecnologias centrais da Agricultura 4.0 podem ser divididas em cinco etapas com funções de percepção (Figura 1), IoT para a comunicação dos dados entre os dispositivos, a computação em Nuvem para armazenamento e processamento dos dados, a análise de dados, incluindo o Big Data, Inteligência Artificial e Machine Learning, e os sistemas de apoio à decisão, para suporte aos usuários com visualização dos dados, ações autônomas de controle e a interação com o usuário por meio de diversos tipos de dispositivos (VARELLA et al., 2022).

Figura 1 – Agricultura 4.0



Fonte: Varella et al. (2022).

A utilização das tecnologias da Agricultura 4.0 abre uma gama de possibilidades aos agricultores, como o controle do uso de recursos como água, nutrientes, pesticidas, energia, maquinários, dispositivos robóticos e recursos humanos. A tomada de decisão baseada em dados, associada a modelos e estratégias para aumento da produção, reaproveitamento de resíduos do processo e diminuição de perdas na cadeia do agronegócio, constitui parâmetro importante para a avaliação de ganhos econômicos, ambientais e sociais. Assim, os ganhos econômicos podem ser avaliados com base na gestão dos recursos de entrada utilizados para a produção, na oferta maior de produtos com qualidade e valor agregado para os consumidores (VARELLA et al., 2022)..

Segundo Sabry (2021), a Agricultura Vertical se trata de um método de produção de culturas em camadas que são empilhadas verticalmente. Onde possui a capacidade de tentar otimizar os desenvolvimentos de plantas e técnicas de agricultura sem solo. São exemplos: hidroponia, aquaponia, aeroponia entre outros. Quando combinados com tecnologia de ponta, como as luminárias de LED personalizadas, os rendimentos das colheitas são dez vezes ou mais do que os métodos agrícolas convencionais.

Conforme Lima (2022, p. 16):

*A agricultura vertical urbana com sistema de iluminação pode ser uma alternativa de infraestrutura verde para aumentar a produção local de alimentos independentemente das condições ambientais e solo. Nesse sistema, o controle da qualidade da luz pode melhorar o desempenho fisiológico de plantas, além de estar associado à indução de vias metabólicas que contribuem para a produção de compostos fenólicos importantes para a saúde humana. (LIMA, 2022, p. 16)*

Entre as técnicas utilizadas na agricultura vertical, destaca-se a aeroponia, um sistema de cultivo sem solo que aprimora os métodos hidropônicos convencionais. Nesse método, as plantas são cultivadas em estruturas de suporte, enquanto suas raízes ficam suspensas no ar e recebem diretamente a aplicação de uma solução nutritiva atomizada em forma de névoa. A névoa fornece de maneira eficiente tanto os nutrientes quanto a oxigenação necessária para o desenvolvimento radicular, uma vez que as raízes permanecem constantemente expostas ao ar (STANGHELLINI; KEMPKE, 2019a).

Essa abordagem permite facilitar o monitoramento de parâmetros fisiológicos e ambientais com precisão, aspectos essenciais em ambientes destinados à pesquisa científica.

Ao eliminar o contato direto das raízes com o solo e reduzir interferências externas, a aeroponia favorece a padronização das condições de cultivo e a reprodutibilidade dos experimentos, tornando-se especialmente adequada para investigações que envolvem o uso de tecnologias IoT aplicadas à agricultura indoor (STANGHELLINI; KEMPKE, 2019a).

Figura 2 – Representação de um Sistema de Aeroponia



Fonte: Elaborado pelo autor com base em Dreamstime.com (2026).

## 2.2 Internet das Coisas

Agricultura de precisão, agricultura vertical e Internet das Coisas (IoT) são alguns dos avanços agrícolas contemporâneos que têm como objetivo auxiliar os agricultores globalmente. Essas medidas são essenciais para assegurar que o fornecimento de alimentos

e produtos agrícolas seja capaz de suprir a crescente demanda da população em constante aumento. Com o contínuo aprimoramento dos computadores, a aplicação do potencial da IoT na agricultura torna-se cada vez mais viável (BELISTA et al., 2018).

Segundo Jesus, Silva e Vieira (2021), a utilização de tecnologias de baixo custo permite uma ampla gama de aplicações da Internet das Coisas (IoT) na agricultura de precisão. Essas aplicações trazem valor científico à área, abrindo caminho para diversas possibilidades, como automação de serviços e a coleta, tratamento, armazenamento e análise de dados obtidos por sensores. Isso resulta na redução de custos e no aumento da produtividade, pois o produtor passa a identificar áreas de baixa e alta produtividade em seu cultivo e a gerenciar essas diferenças com maior precisão.

### 2.3 Dispositivos de automação e monitoramento

A automação e o monitoramento em projetos de *Internet of Things* (IoT), especialmente em pesquisas acadêmicas, dependem de microcontroladores que ofereçam flexibilidade, baixo custo e conectividade. Historicamente, a plataforma *Arduino* (baseada em microcontroladores Atmel, como o ATmega328P) foi fundamental para a prototipagem e o ensino de sistemas embarcados. Sua simplicidade e a vasta quantidade de bibliotecas a tornam uma escolha popular para o controle de atuadores e a leitura de sensores simples. No entanto, sua falta de conectividade nativa (exigindo módulos externos) abriu espaço para soluções mais integradas (HENRIQUES, 2021).

Nesse cenário, o *ESP8266*, desenvolvido pela *Espressif Systems*, revolucionou o mercado ao oferecer um microcontrolador de baixo custo com conectividade *Wi-Fi* integrada. Ele é amplamente utilizado em trabalhos acadêmicos para a criação de “nós sensores” (*sensor nodes*), onde o principal requisito é coletar dados (como temperatura, umidade) e transmiti-los para uma plataforma em nuvem ou um servidor local.

Uma evolução direta, o *ESP32* (também da *Espressif Systems*), tornou-se um dos dispositivos preferidos para aplicações de IoT mais complexas, sendo o cérebro deste projeto. O *ESP32* é um microcontrolador amplamente utilizado em aplicações de *Internet of Things* (IoT) devido ao seu baixo custo, versatilidade e alta capacidade de processamento. Esse dispositivo integra conectividade *Wi-Fi* e *Bluetooth*, o que permite a criação de sistemas embarcados conectados e autônomos. Segundo Henriques (2021), o *ESP32* apresenta especificações robustas, como processador *dual-core Xtensa LX6*, clock de até 240 MHz, 520 KB de RAM e suporte a diversos protocolos de comunicação, tornando-o ideal para aplicações que exigem processamento em tempo real e integração com sensores e atuadores. Sua arquitetura facilita a comunicação com plataformas em nuvem via protocolos leves, como o *Message Queuing Telemetry Transport* (MQTT), favorecendo o monitoramento remoto e a análise de dados agrícolas em tempo real. Enquanto o *ESP8266* é ideal para nós sensores distribuídos, o *ESP32* é frequentemente empregado como o controlador central, capaz de agregar dados e gerenciar múltiplos atuadores.

Finalmente, uma variante popular é o *ESP32-CAM*. Este dispositivo combina o poder do *ESP32* com um módulo de câmera, oferecendo uma solução de baixíssimo custo para monitoramento visual remoto. Em contextos acadêmicos, é frequentemente aplicado para o registro de imagens, *timelapses* (como o acompanhamento do crescimento de plantas) ou até mesmo para tarefas simples de visão computacional, transmitindo as imagens via *Wi-Fi*.

## 2.4 Monitoramento Automatizado na Agricultura Vertical

Com o avanço das tecnologias nas últimas décadas, a integração de sistemas inteligentes aos processos produtivos tornou-se um elemento central da chamada Indústria 4.0 (Quarta Revolução Industrial). No contexto da agricultura vertical, essa transformação tecnológica é impulsionada pela necessidade de monitoramento contínuo e preciso das condições ambientais, garantindo maior controle e eficiência nos cultivos indoor. A Internet das Coisas (IoT) consolida-se, nesse cenário, como uma ferramenta essencial para a coleta, o processamento e a análise de dados em tempo real, possibilitando o acompanhamento remoto e autônomo dos parâmetros de cultivo (BACHIM et al., 2020).

De acordo com Huh (2017), a aplicação de dispositivos IoT em sistemas agrícolas permite a supervisão integral de processos, reduzindo significativamente a dependência da intervenção humana. Em seus estudos, o autor demonstra a utilização de controladores lógicos programáveis (CLPs) integrados a aplicativos móveis para o monitoramento remoto de variáveis ambientais e operacionais, assegurando o funcionamento contínuo do sistema mesmo diante de variações externas, como interrupções de energia.

Essa abordagem evidencia o potencial da IoT para criar ambientes agrícolas inteligentes e autônomos, nos quais sensores e atuadores posicionados estrategicamente coletam e transmitem informações críticas para plataformas em nuvem. Assim, é possível realizar ajustes automáticos e decisões baseadas em dados, minimizando a necessidade de presença física no ambiente de cultivo fator especialmente relevante em pesquisas científicas, onde a interferência humana pode alterar resultados experimentais e comprometer a confiabilidade dos dados obtidos.

A adoção das tecnologias da Agricultura 4.0 tem demonstrado resultados expressivos em ganhos econômicos e aumento de produtividade. No Brasil, a produtividade da agropecuária cresceu em média 3,36% ao ano na última década, impulsionada pela modernização tecnológica e pelo uso eficiente de insumos (Brasil. Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA, 2024).

Em experimentos práticos, fazendas conectadas apresentaram ganho de até 18% em produtividade e redução de 25% no consumo de combustível por hectare, evidenciando os impactos positivos da conectividade e da agricultura digital (ESTADÃO, 2023). Estudos adicionais apontam que a adoção de IoT e agricultura de precisão pode gerar ganhos econômicos de até US\$ 21,1 bilhões no Brasil (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES, 2022), além de reduzir custos com fertilizantes em até 30% e o consumo de água em cerca de 20%, contribuindo simultaneamente para eficiência produtiva, sustentabilidade ambiental e competitividade do agronegócio (Springer, 2024).

## 2.5 Sensoriamento Agrícola

No contexto do sensoriamento agrícola, a IoT tem se mostrado uma ferramenta essencial para aprimorar o controle e a gestão das variáveis ambientais em sistemas produtivos. A coleta automática de dados como umidade do solo, temperatura, luminosidade e qualidade do ar permite o acompanhamento contínuo das condições do cultivo e a realização de ajustes automáticos com base em dados concretos. Henriques (2021) destaca que o uso de sensores conectados a microcontroladores como o *ESP32* possibilita a transmissão de dados diretamente para plataformas de visualização, como o *TagoIO*, permitindo ao usuário monitorar e gerenciar remotamente a irrigação de forma eficiente e com baixo consumo energético.

A aplicação do sensoriamento IoT na agricultura representa um avanço significativo

rumo à chamada Agricultura 4.0, que busca integrar tecnologia e sustentabilidade. De acordo com EMBRAPA (2020b), o uso de dispositivos conectados e sistemas automatizados permite que o agricultor tenha acesso a informações precisas sobre o ambiente de cultivo, favorecendo a tomada de decisão baseada em dados e reduzindo desperdícios de recursos naturais. Os sistemas agrícolas baseados em IoT promovem maior eficiência no uso da água e de insumos, além de possibilitar o controle automatizado de processos, como irrigação e climatização. Essa automação reduz a necessidade de intervenção humana e garante maior uniformidade nas condições de cultivo, características essenciais para ambientes controlados e pesquisas científicas.

Além disso, a combinação entre o *ESP32* e sensores inteligentes cria uma infraestrutura escalável e adaptável a diferentes cenários agrícolas, desde pequenas hortas urbanas até sistemas verticais e laboratórios de pesquisa. A conectividade via *Wi-Fi* do *ESP32* facilita a integração com bancos de dados e *dashboards*, enquanto sua compatibilidade com a *IDE Arduino* simplifica o desenvolvimento e a implementação de novos projetos. Dessa forma, conforme argumentam Henriques (2021) e EMBRAPA (2020b), o uso de dispositivos IoT constitui um pilar tecnológico fundamental para o avanço da automação agrícola, contribuindo para a eficiência produtiva, o monitoramento contínuo e a redução do impacto ambiental nas práticas agrícolas modernas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Classificação da pesquisa

Este trabalho consistiu no desenvolvimento e na validação de uma arquitetura IoT em um ambiente real de cultivo indoor, conduzida na forma de um estudo de caso. A avaliação concentrou-se no funcionamento operacional do sistema isto é, em sua capacidade de monitorar, automatizar e registrar as condições de cultivo, e não na comparação estatística de desempenho produtivo entre diferentes tratamentos agrônômicos.

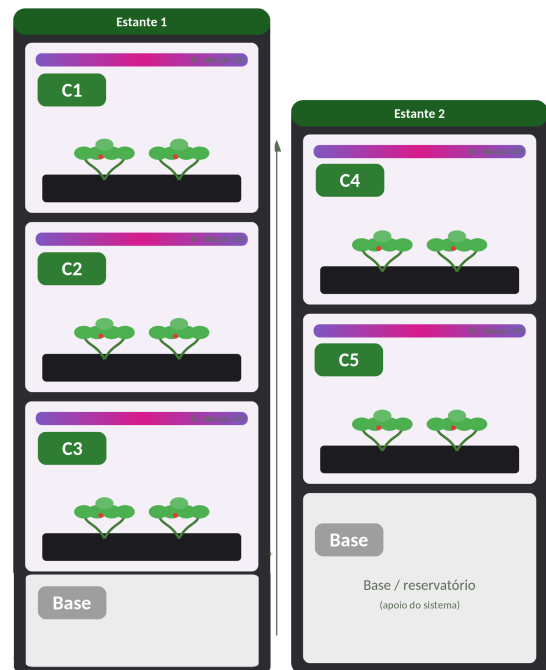
#### 3.2 Câmaras de cultivo para agricultura vertical

Foi construída uma estrutura metálica destinada a abrigar os compartimentos do sistema, permitindo tanto a disposição organizada dos módulos eletrônicos quanto a implementação da infraestrutura necessária para a circulação da solução nutritiva. A estrutura foi dividida em cinco câmaras, identificados como C1, C2, C3, C4 e C5, de modo a facilitar o monitoramento individualizado das condições ambientais de cada cultivo.

Figura 3 – Câmaras de cultivo com cinco compartimentos destinadas ao cultivo indoor.



(a) Estrutura física real.



(b) Disposição esquemática das câmaras (C1–C5).

Fonte: Autor (2026).

Adicionalmente, recorreu-se à impressão 3D para a confecção de caixas personalizadas, conforme apresentado na Figura 4, com a finalidade de aprimorar o acabamento visual do projeto e proteger os dispositivos eletrônicos e suas conexões expostas. Também foram utilizadas caixas plásticas com 90 cm de altura x 90 cm de largura x 90 cm de profundidade para o alojamento das mudas de morango e para a instalação dos equipamentos de aspersão,

garantindo a adequada manutenção das condições hídricas e nutricionais no ambiente de cultivo.

Figura 4 – Módulo ESP8266 protegido por caixa produzida por impressão 3D.



Fonte: Autor (2026).

### 3.3 Sistema de irrigação

A técnica de irrigação adotada neste trabalho foi a aeroponia, pois está em concordância com as necessidades experimentais do Laboratório de Pesquisas Avançadas em Agricultura Vertical Indoor, onde o protótipo foi desenvolvido. Nesse sistema, a solução nutritiva é aplicada diretamente na zona radicular das plantas por meio de nebulização, permitindo o fornecimento de água e nutrientes sem a necessidade de solo ou substrato convencional.

Para viabilizar a distribuição da solução nutritiva, foram empregados bicos de nebulização, apresentados na Figura 5, responsáveis por transformar o líquido em micro-partículas que atingem diretamente as raízes das mudas.

Figura 5 – Visão interna da caixa plastica adaptada com sistema de nebulização para cultivo de plantas em sistemas de aeroponia.



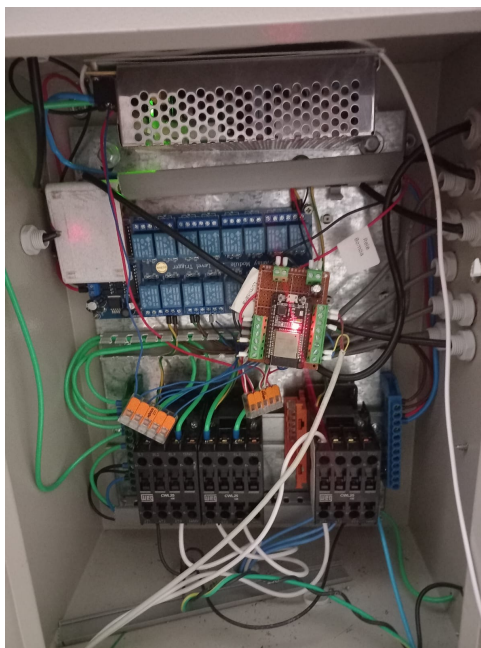
Fonte: Autor (2026).

A escolha dos bicos levou em consideração aspectos técnicos como ângulo de pulverização, diâmetro médio da gota e vazão de operação, de modo a favorecer a uniformidade no alcance da solução e reduzir o risco de entupimento. O uso desses dispositivos, associado ao controle automatizado via IoT, possibilitou a configuração de ciclos de fertirrigação adequados ao experimento proposto.

### 3.4 Arquitetura do sistema de controle e monitoramento

O equipamento IoT desenvolvido para pesquisas científicas integra diferentes componentes eletrônicos e elementos estruturais, com foco na coleta de dados ambientais, no acionamento de atuadores e na comunicação com plataforma em nuvem. O componente central do sistema é o microcontrolador ESP32 (Figura 7), que atua como unidade de processamento e comunicação entre os módulos distribuídos, os sensores, os atuadores e a Arduino Cloud.

Figura 6 – Circuito principal com ESP32 instalado na estrutura de cultivo indoor.



Fonte: Autor (2026).

A cadeia de comunicação adotada no protótipo foi definida da seguinte forma: sensores ambientais conectados aos módulos ESP8266 realizam a leitura local (umidade, temperatura, iluminação); os dados são encaminhados ao ESP32 por comunicação compartilhada de variáveis em ambiente cloud, O ESP32 por sua vez atua como controlador central; em seguida, o ESP32 transmite as informações para a Arduino Cloud, onde ocorre a visualização em dashboard, o armazenamento histórico, a exportação dos dados e o envio de notificações ao usuário. Assim, a arquitetura pode ser sintetizada como: sensores → ESP8266 → ESP32 → Arduino Cloud → dashboard/notificações → usuário (Tabela 1).

Tabela 1 – Camadas da arquitetura computacional do sistema IoT

Camada	Componente	Função	Protocolo ou interface
Sensoriamento	DHT22 e LDR	Coleta de temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade detectada	GPIO/ADC
Nó distribuído	ESP8266	Leitura local dos sensores instalados nos compartimentos	Wi-Fi/comunicação local
Controle central	ESP32	Processamento, integração dos dados e acionamento de atuadores	GPIO/Wi-Fi
Nuvem	Arduino Cloud	Armazenamento, dashboard, exportação de dados e notificações	MQTT/Arduino IoT
Interface	Aplicativo/Web	Visualização remota, comandos e acompanhamento do sistema	Internet

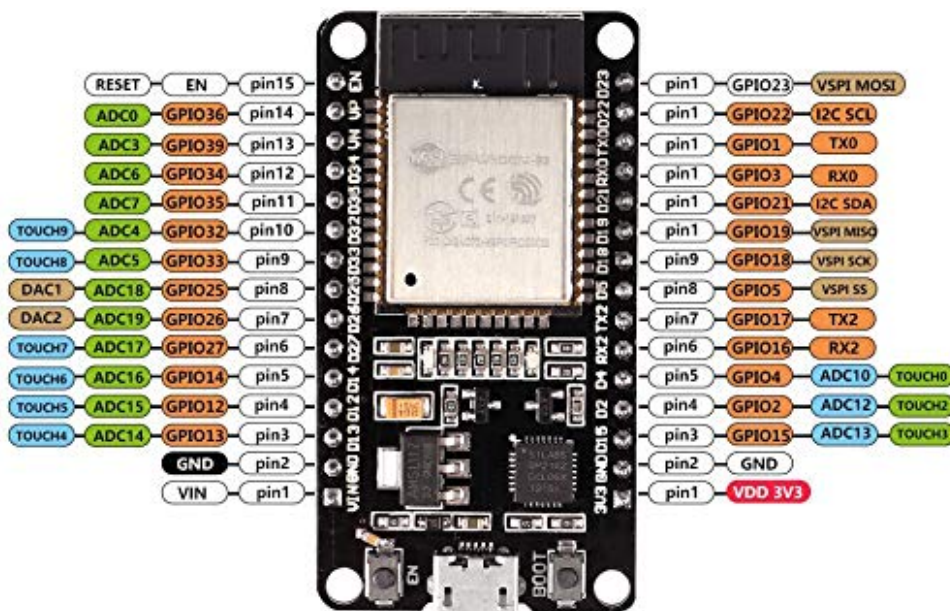
Fonte: Autor (2026).

### 3.4.1 Sistema IoT de sensoriamento

O sistema de sensoriamento foi estruturado com base em uma arquitetura IoT distribuída, na qual o microcontrolador ESP32 atua como unidade central de processamento e integração dos dados ambientais. Os cinco módulos ESP8266, posicionados nos diferentes compartimentos da estrutura de cultivo vertical, são responsáveis pela aquisição de variáveis como temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade.

As informações coletadas são transmitidas ao ESP32, que realiza o processamento local e a interpretação dos dados recebidos. Além do monitoramento, o ESP32 também executa o controle automático dos atuadores, como bomba de fertirrigação, ventiladores e luminárias, acionando-os conforme horários previamente definidos ou conforme condições ambientais detectadas pelo sistema.

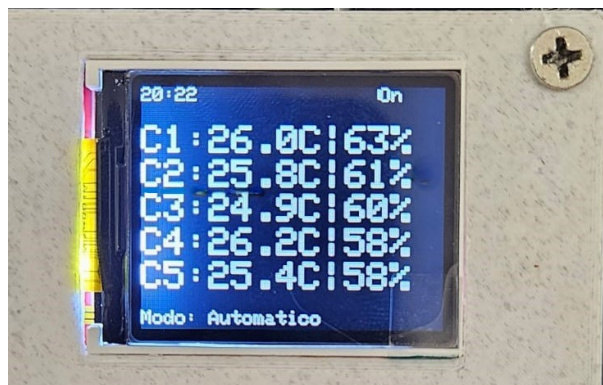
Figura 7 – Microcontrolador ESP32 utilizado como unidade central do sistema.



Fonte: Amazon (2026)

Todos os dados coletados são transmitidos via comunicação MQTT para a Arduino Cloud, uma plataforma baseada em nuvem que possibilita o armazenamento histórico das informações, o monitoramento remoto e a análise de tendências do cultivo. A Arduino Cloud também permite o controle remoto dos atuadores, possibilitando ajustes de parâmetros e configuração do sistema a partir de dispositivos conectados à internet, além de fornecer dashboards interativos para visualização gráfica dos dados.

Figura 8 – Display LCD TFT 128x168 utilizado para visualização local das informações do sistema.



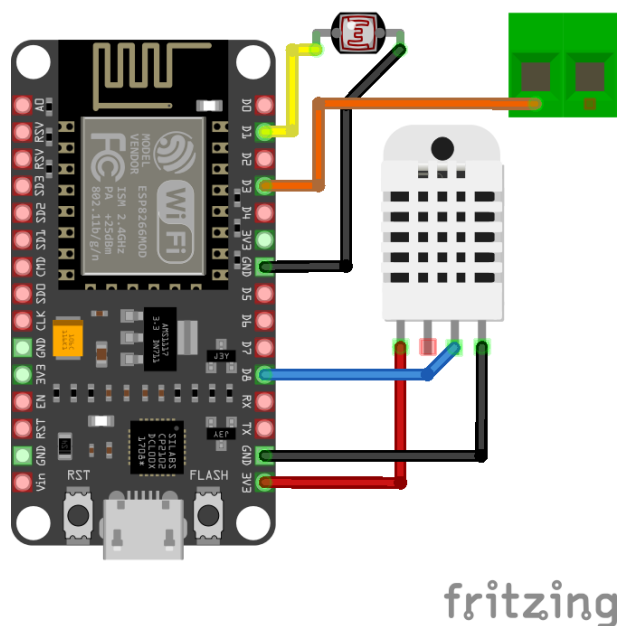
Fonte: Autor (2026).

Para acompanhamento local, o sistema conta com um display LCD TFT 128x168, apresentado na Figura 8, que exibe os valores sensorizados, o status dos atuadores e indicadores visuais de funcionamento do equipamento. Esse recurso facilita a tomada de decisão imediata durante os experimentos e permite a observação local das condições ambientais.

O ESP8266 é um microcontrolador de baixo custo com capacidade de comunicação Wi-Fi, amplamente utilizado em aplicações IoT devido à sua facilidade de integração e transmissão de dados em tempo real. Cada módulo ESP8266 está equipado com um sensor DHT22, responsável pela medição de temperatura e umidade relativa do ar, e com um LDR de 10 mm, utilizado para detectar a presença de iluminação no ambiente de cultivo. O sensor LDR deve ser calibrado em cada câmara para ajuste do nível mínimo de luminosidade, uma vez que as câmaras não são totalmente isoladas da claridade externa.

Os dados coletados pelo sensor DHT22 são enviados ao ESP8266 por meio de porta digital, enquanto o LDR é conectado à entrada analógica do módulo. Conforme ilustrado no esquema elétrico da Figura 9, o ESP8266 também envia sinal de controle para acionamento de relé associado à ventilação do compartimento. Esse ventilador tem a função de promover circulação de ar, contribuindo para a renovação do ambiente interno e para a distribuição de temperatura e umidade dentro da câmara.

Figura 9 – Esquemático do módulo ESP8266 com sensores e saída de acionamento.



Fonte: Autor (2026).

Esses módulos permitem monitorar continuamente as condições ambientais, garantindo que os dados sejam enviados ao microcontrolador central para processamento, armazenamento na Arduino Cloud e acionamento automático dos dispositivos de automação conforme a lógica definida no sistema.

Além da transmissão dos dados para a Arduino Cloud, a arquitetura do sistema foi planejada considerando a necessidade de redundância no armazenamento das informações experimentais. Em ambientes voltados à pesquisa científica, a preservação dos dados coletados é essencial para garantir rastreabilidade, reprodutibilidade e posterior análise dos resultados. Dessa forma, a plataforma em nuvem foi utilizada como repositório principal para visualização, histórico e exportação dos dados ambientais, enquanto o armazenamento local em cartão de memória foi adotado como estratégia complementar para reduzir o risco de perda de informações em situações de instabilidade de conexão ou indisponibilidade temporária da rede.

Essa redundância contribui para aumentar a confiabilidade da coleta, pois permite que os dados não dependam exclusivamente da conectividade em tempo real. Assim, mesmo em cenários de falha temporária na comunicação com a internet, a estrutura mantém uma estratégia de preservação local das informações, possibilitando posterior recuperação e comparação com os dados armazenados em nuvem.

### 3.4.2 Sistema de monitoramento visual

Além do sensoriamento dos dados ambientais, o projeto incorporou um sistema automatizado de monitoramento visual, destinado ao registro periódico do desenvolvimento das culturas. Para essa finalidade, foi utilizado um módulo *ESP32-CAM* em cada câmara de cultivo. Esse dispositivo integra um microcontrolador ESP32, uma câmera compacta e suporte para cartão de memória, constituindo uma solução de baixo custo, conectada e adequada ao acompanhamento remoto por imagens.

No sistema desenvolvido, a *ESP32-CAM* foi programada para realizar registros fotográficos periódicos dos compartimentos de cultivo. Durante o período experimental analisado, foram consideradas 5 capturas diárias para cada um dos 5 compartimentos, totalizando 800 imagens no intervalo de 07/05/2025 a 07/06/2025. Esses registros permitiram o acompanhamento visual da evolução das plantas e a complementação dos dados ambientais obtidos pelos sensores.

Para garantir redundância e acesso remoto aos dados visuais, o software embarcado no módulo executa duas ações de armazenamento:

- **Armazenamento local:** a imagem capturada é salva em um cartão SD acoplado diretamente ao módulo *ESP32-CAM*;
- **Armazenamento em nuvem:** após o armazenamento local, o dispositivo utiliza sua conectividade Wi-Fi para enviar a fotografia para um repositório dedicado no Google Drive.

Essa abordagem permitiu o acompanhamento cronológico e visual do progresso do experimento, validando o uso da câmera como recurso complementar de rastreabilidade experimental, sem necessidade de intervenção humana constante no local.

### 3.4.3 Iluminação controlada

No sistema desenvolvido, cinco luminárias são acionadas automaticamente com base em programação horária, associada ao controle do fotoperíodo do cultivo. A iluminação artificial foi empregada para fornecer condições adequadas ao desenvolvimento das plantas em ambiente indoor, no qual a radiação natural é limitada ou inexistente.

Figura 10 – Compartimento de cultivo com iluminação artificial.



Fonte: Autor (2026).

As luminárias de luz branca utilizadas no experimento fornecem iluminação para o desenvolvimento das plantas, contribuindo para a fotossíntese, fotomorfogênese e

manutenção do ciclo de crescimento. A configuração do fotoperíodo foi definida de acordo com as necessidades experimentais do cultivo e pode ser ajustada conforme a cultura utilizada em estudos futuros.

Para acompanhar o funcionamento do sistema de iluminação, cada compartimento foi equipado com um sensor LDR de 10 mm, utilizado como indicador binário da presença ou ausência de luz. Cada sensor foi calibrado individualmente, considerando-se o valor mínimo de resistência elétrica associado à intensidade luminosa captada, a fim de estabelecer o limiar de detecção adequado para cada câmara de cultivo.

Assim, os registros de luminosidade analisados neste trabalho não representam medições quantitativas de luminosidade em unidades radiométricas, como PPF, mas sim o estado detectado pelo sensor em relação à presença de iluminação no compartimento. Essa abordagem permitiu verificar se a iluminação foi percebida pelo sistema durante o período programado, contribuindo para a validação funcional do fotoperíodo.

### 3.5 Sistema integrado de controle e monitoramento

O software do sistema foi desenvolvido na linguagem C++, utilizando a Arduino IDE como ambiente de programação, de forma a garantir flexibilidade na integração com os diversos módulos de hardware. Para viabilizar as funcionalidades do sistema, foram empregadas bibliotecas específicas, cada uma com papel essencial na operação do protótipo.

As bibliotecas *Wire.h*, *Adafruit\_GFX.h*, *Adafruit\_ST7735.h* e *SPI.h* foram utilizadas para a interface e controle do display LCD, permitindo a exibição local dos dados coletados. A biblioteca *time.h* viabilizou a sincronização horária por meio de servidores NTP (*Network Time Protocol*), assegurando maior precisão nos registros de eventos e no acionamento automático dos dispositivos. Para a leitura dos sensores de temperatura e umidade, empregou-se a biblioteca *DHT.h*, enquanto a *ArduinoCloudThingProperties.h* possibilitou a integração direta com a Arduino Cloud, recurso fundamental para o armazenamento, análise e monitoramento remoto dos dados. Por fim, a biblioteca *WiFi.h* foi utilizada para estabelecer a comunicação dos módulos ESP8266 e ESP32 com a rede sem fio local.



**Algoritmo 1** Controle dos relés do sistema.

```

void handleRelays(unsigned long currentMillis, int hour,
  int minute) {
  if (hour >= 6 && hour < 20) {
    // Ligar relés 1 a 5
    for (int i = 1; i <= 5; i++) digitalWrite(RELAY_PIN_1,
      LOW);

    // Controle cíclico do rele 6 (ligarBomba)
    if (!relayState && currentMillis - previousRelay6Millis
      >= INTERVAL_OFF) {
      relayState = true;
      motor = relayState;
      digitalWrite(RELAY_PIN_6, LOW);
      tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
      previousRelay6Millis = currentMillis;
      tft.setCursor(0, 118);
      tft.setTextSize(1);
      tft.print("Modo: ");
      tft.print(modo ? "Automatico" : "Manual      ");
    } else if (relayState && currentMillis -
      previousRelay6Millis >= INTERVAL_ON) {
      relayState = false;
      motor = relayState;
      digitalWrite(RELAY_PIN_6, HIGH);
      previousRelay6Millis = currentMillis;
    }
  } else {
    // Desligar todos os relés
    for (int i = 1; i <= 5; i++) digitalWrite(RELAY_PIN_1,
      HIGH);
    digitalWrite(RELAY_PIN_6, HIGH);
    motor = false;
  }

  // Acionamento do rele 6 as 03:00 por 1 minuto
  if (hour == 3 && minute == 0 && currentMillis -
    previousMidnightRelayMillis >= INTERVAL_ON) {
    previousMidnightRelayMillis = currentMillis;
    digitalWrite(RELAY_PIN_6, LOW);
    delay(60000);
    digitalWrite(RELAY_PIN_6, HIGH);
  }
}

```

Fonte: Autor (2026).

No algoritmo apresentado, a função *handleRelays* realiza parte do processo de controle das luminárias, relacionadas ao fotoperíodo, e do fornecimento da solução nutritiva, por meio do acionamento da bomba de fertirrigação. Essa função recebe como parâmetros

os milissegundos atuais, a hora e os minutos do sistema. A lógica de controle permite configurar janelas horárias específicas para o acionamento das luminárias e da bomba, possibilitando a adaptação do fotoperíodo e dos ciclos de fertirrigação conforme a cultura utilizada no experimento.

O controle cíclico da fertirrigação foi implementado com variáveis de estado e controle temporal em milissegundos, utilizando intervalos definidos entre 60.000 ms, equivalentes a 1 minuto, e 300.000 ms, equivalentes a 5 minutos. Esse ciclo foi definido em consultoria com pesquisadores da área agrônômica e aplicado ao cultivo experimental de morango. Dessa forma, os parâmetros de fotoperíodo e fertirrigação podem ser ajustados para diferentes culturas e protocolos experimentais.

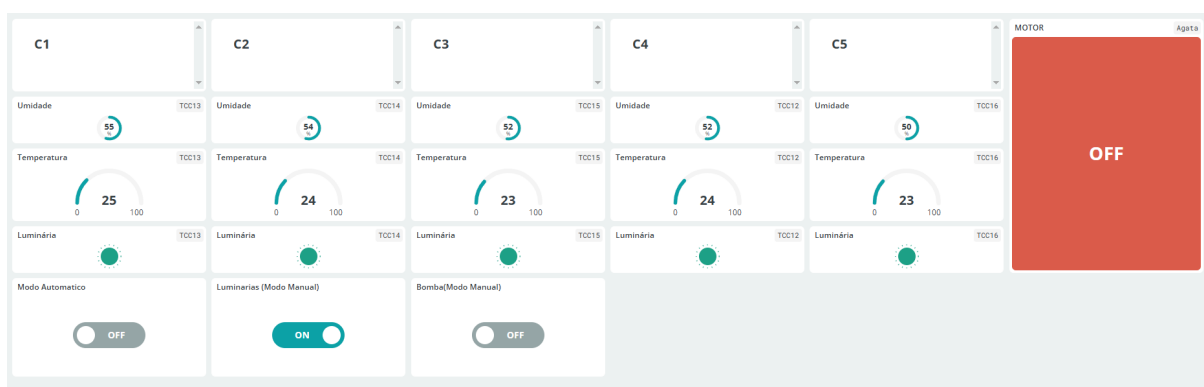
### 3.5.1 Controle manual e retorno automático

Além do acionamento automático programado, o sistema também permitia o controle manual das luminárias e demais atuadores, recurso utilizado em situações específicas de manutenção, inspeção e demonstração do funcionamento do equipamento. Para evitar que uma intervenção manual permanecesse ativa por tempo indeterminado, foi implementado um mecanismo de retorno automático ao modo programado após aproximadamente uma hora. Dessa forma, caso o operador não restabelecesse manualmente o funcionamento automático, o próprio sistema retomava a lógica de controle definida, reduzindo o risco de interferência prolongada no fotoperíodo e nas demais rotinas operacionais do cultivo.

### 3.6 Interface em nuvem para interação e visualização

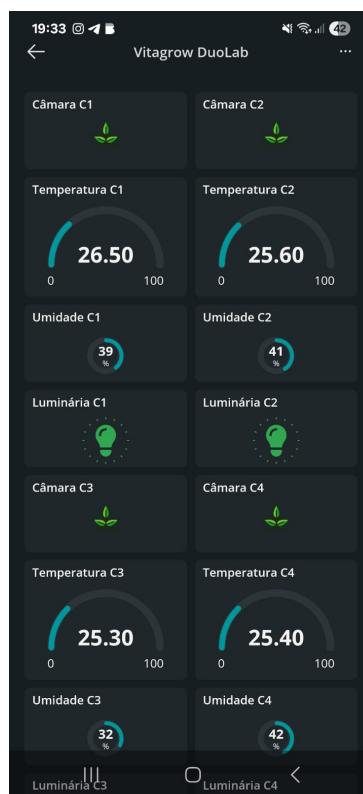
A coleta de dados é realizada de forma distribuída. Os módulos ESP8266 capturam e enviam informações periodicamente ao ESP-WROOM-32, que processa os dados e os exibe tanto no display LCD quanto no dashboard da Arduino Cloud.

Figura 12 – Dashboard da Arduino Cloud em ambiente web.



Fonte: Autor (2026).

Figura 13 – Dashboard da Arduino Cloud em aplicativo móvel.



Fonte: Autor (2026).

As variáveis monitoradas incluem:

- temperatura e umidade relativa do ar, coletadas pelos sensores DHT22;
- luminosidade, monitorada por sensor LDR de 10 mm;
- status da bomba de fertirrigação, das luminárias e dos dispositivos de ventilação, acompanhados por meio da lógica de controle do sistema;
- registros de estado operacional e conectividade, utilizados para envio de notificações e acompanhamento remoto.

Essas leituras são transmitidas à Arduino Cloud, permitindo a visualização remota dos dados e possibilitando o envio de comandos para ajustes no sistema.

Para viabilizar o armazenamento histórico dos dados, o acompanhamento remoto e o uso dos recursos de dashboard disponibilizados pela Arduino Cloud, foi necessária a contratação de um plano pago da plataforma, no valor de US\$ 6,00 durante o período de utilização do sistema. Esse custo foi considerado parte da infraestrutura operacional necessária para a execução do experimento, uma vez que a plataforma em nuvem desempenhou papel central na visualização, no registro e na exportação dos dados ambientais analisados.

### 3.7 Coleta, tratamento e análise dos dados

Os dados ambientais utilizados na análise foram obtidos a partir dos registros exportados da Arduino Cloud em formato CSV. Para fins de padronização metodológica, foram considerados apenas os registros compreendidos entre 07/05/2025 e 07/06/2025, período correspondente à etapa de avaliação do cultivo experimental de morango.

As variáveis ambientais analisadas foram temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade. A temperatura e a umidade foram coletadas por sensores DHT22 instalados

nos cinco compartimentos de cultivo, enquanto a luminosidade foi acompanhada por sensores LDR de 10 mm. Para a variável luminosidade, os registros foram tratados como variável booleana, indicando presença ou ausência de luz detectada, não correspondendo à medição quantitativa de luminosidade em lux ou PPFD.

O tratamento dos dados foi realizado em Python, com apoio das bibliotecas *Pandas* e *Matplotlib*, a partir dos arquivos CSV exportados da Arduino Cloud. Foram considerados inconsistentes e removidos antes das análises: registros fora do período definido, valores nulos, valores sentinela gerados pela exportação, registros sem marcação temporal válida e valores incompatíveis com a escala física das variáveis monitoradas. Para temperatura, foram descartados valores menores que 0 °C ou maiores que 60 °C; para umidade relativa do ar, foram descartados valores menores que 0% ou maiores que 100%. Quando identificadas duplicidades exatas de timestamp e valor dentro da mesma série, os registros duplicados também foram desconsiderados. Esses critérios foram adotados para evitar distorções no cálculo das médias, valores mínimos, valores máximos e desvios-padrão. A partir dos dados tratados, foram gerados gráficos de média diária e gráficos do tipo boxplot, utilizados para avaliar o comportamento temporal e a dispersão dos dados ambientais entre os compartimentos.

Os gráficos apresentados no capítulo de resultados foram elaborados a partir dos dados tratados. As curvas temporais representam médias diárias, enquanto os boxplots representam a distribuição dos registros válidos após a remoção dos valores inconsistentes.

Como não foi possível recuperar, nos arquivos exportados, o histórico real dos acionamentos da bomba de solução nutritiva, a contabilização desse atuador foi realizada a partir da programação operacional definida para o sistema.

Durante o período analisado, também foram considerados os registros de notificações por e-mail referentes ao estado operacional do sistema.

### 3.8 Procedimentos do caso de uso experimental com cultivo de morango

Com o intuito de validar as funcionalidades e a adequação do sistema integrado, foi proposto, juntamente com o Laboratório de Pesquisas Avançadas em Agricultura Vertical Indoor do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob orientação dos pesquisadores Dra. Fábيا Barbosa da Silva e Ms. Rafael Carvalho de Mendonça, um caso de uso experimental com cultivo de morango. O objetivo foi avaliar a aplicabilidade do sistema em pesquisas científicas envolvendo cultivo de hortaliças e frutas em agricultura vertical indoor.

O sistema foi projetado com foco no monitoramento automatizado do cultivo de morango por meio da integração de sensores e atuadores conectados à Internet das Coisas, possibilitando a observação contínua das variáveis ambientais e a redução da necessidade de intervenção humana direta. A arquitetura desenvolvida permite que os principais processos sejam controlados e supervisionados de forma autônoma, contribuindo para a manutenção das condições de cultivo, a rastreabilidade dos dados e a reprodutibilidade dos experimentos em ambiente indoor.

As principais funcionalidades avaliadas incluem:

- **Fotoperíodo da cultura:** ativação automática das luminárias no período programado para o cultivo experimental, assegurando condições adequadas de iluminação para o desenvolvimento das plantas;
- **Monitoramento climático:** monitoramento das variáveis ambientais de temperatura, umidade relativa do ar e luminosidade nos compartimentos de cultivo;

- **Supervisão do sistema de iluminação:** identificação de ausência de luz durante o período de funcionamento esperado por meio do sensor LDR de 10 mm, permitindo o envio de alerta à nuvem e o registro do evento;
- **Ventilação dos compartimentos:** acionamento de ventiladores para favorecer a circulação de ar no interior das câmaras durante o período de operação do sistema;
- **Fertirrigação:** operação da bomba de irrigação em ciclos de 1 minuto ligada e 5 minutos desligada. Para a contabilização operacional apresentada nos resultados, considerou-se o funcionamento diário das 06h às 20h, acrescido de um ciclo adicional na madrugada com o mesmo padrão de acionamento;
- **Monitoramento visual:** captura periódica de imagens por meio da *ESP32-CAM*, considerando 5 fotos diárias em cada um dos 5 compartimentos durante o período analisado;
- **Gestão de energia e conectividade:** envio de notificações automáticas relacionadas ao estado operacional do sistema e realização de tentativas de reconexão em caso de perda de comunicação com a rede Wi-Fi ou com a Arduino Cloud.

Além disso, notificações automáticas foram configuradas para informar alterações no estado de funcionamento do sistema, especialmente eventos de ligado e desligado. Durante o período analisado, esses registros foram utilizados como indicadores de disponibilidade operacional. Entretanto, a metodologia adotada não permitiu diferenciar, de forma individualizada, se cada evento de desligamento decorreu de queda de energia elétrica ou de perda de conexão com a internet. Conforme observado durante a execução do experimento, a maior parte das ocorrências esteve associada à instabilidade da conexão via Starlink.

Dessa forma, o sistema IoT contribuiu para o monitoramento, a rastreabilidade e a automação de rotinas operacionais em agricultura vertical indoor, além de fornecer uma base experimental para análises futuras envolvendo maior precisão no controle ambiental, incorporação de sensores adicionais e avaliação agrônômica das plantas cultivadas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Validação operacional da arquitetura IoT

O sistema desenvolvido integrou sensores, atuadores, microcontroladores e uma plataforma em nuvem para monitoramento e automação de um ambiente de agricultura vertical indoor. Durante a validação experimental, o sistema operou de forma integrada e estável, cumprindo as funções propostas e reduzindo a necessidade de intervenção humana direta.

A validação, realizada durante o cultivo experimental de morango, confirmou o funcionamento contínuo do sensoriamento ambiental, da automação dos atuadores, da comunicação com a Arduino Cloud, do envio de notificações e do registro visual por meio da \*ESP32-CAM\*. Além disso, devido à sua arquitetura modular, o sistema pode ser adaptado para diferentes culturas e metodologias de cultivo, como hidroponia, aeroponia e sistemas híbridos.

Os dados ambientais utilizados nesta análise foram exportados em formato CSV, abrangendo o período de 07/05/2025 a 07/06/2025. Dessa forma, o conjunto de dados analisado corresponde a 32 dias de monitoramento ambiental. Para a análise estatística, foram considerados apenas os registros pertencentes a esse intervalo, **sendo removidos valores incompatíveis com a escala física das variáveis monitoradas**.

A Tabela 2 apresenta uma síntese das funções avaliadas no sistema, os critérios considerados na validação e os resultados obtidos a partir dos dados fornecidos, da programação operacional definida e das observações experimentais.

Tabela 2 – Síntese da validação operacional das funções do sistema

Função avaliada	Critério de validação	Resultado obtido	Situação
Leitura de temperatura	Registro periódico das leituras nas câmaras de cultivo	2.142.570 leituras válidas de temperatura registradas	Validado
Leitura de umidade	Registro periódico das leituras nas câmaras de cultivo	326.233 leituras válidas de umidade registradas	Validado
Monitoramento da luminosidade	Deteção de presença ou ausência de luz pelo LDR	5.084.271 registros válidos de luminosidade, com 2.987.011 registros indicando luz detectada	Validado
Monitoramento em nuvem	Disponibilização dos dados ambientais em plataforma remota	Dados exportados em arquivos CSV com marcação temporal e valores registrados	Validado
Acionamento da bomba	Ciclo de 5 min desligada e 1 min ligada, das 06h às 20h, com um acionamento adicional na madrugada	4.512 ciclos estimados de acionamento durante os 32 dias analisados	Estimado por rotina programada;
Notificação de funcionamento	Envio de alertas por e-mail informando estado ligado e desligado do sistema	77 notificações de ligado e 77 notificações de desligado registradas por e-mail	Validado
Captura de imagens	Registro visual diário dos compartimentos por meio da <i>ESP32-CAM</i>	800 imagens no período analisado	Validado

Fonte: Autor (2026).

A validação operacional apresentada na Tabela 2 evidencia que a **arquitetura** proposta não se limitou à coleta isolada de dados, mas integrou sensoriamento, armazenamento em nuvem, acionamento de atuadores, notificações e acompanhamento visual. Esse tipo de integração é coerente com os princípios da Agricultura 4.0, nos quais sensores, conectividade e sistemas de apoio à decisão são utilizados para ampliar a rastreabilidade, a automação e a capacidade de monitoramento dos sistemas produtivos (VARELLA et al., 2022).

Além disso, a utilização de microcontroladores conectados, como ESP32 e ESP8266, está alinhada a trabalhos que destacam o papel de dispositivos IoT de baixo custo na coleta, transmissão e análise de dados agrícolas (JESUS; SILVA; VIEIRA, 2021). A organização dos resultados em critérios objetivos permite demonstrar que a validação do sistema não se baseou apenas na constatação geral de funcionamento, mas na verificação de funções específicas da arquitetura proposta. Dessa forma, os resultados indicam que o sistema foi capaz de registrar variáveis ambientais, operar atuadores conforme programação definida, emitir notificações e possibilitar acompanhamento visual do cultivo, compondo uma solução integrada para apoio a experimentos em agricultura vertical indoor.

## 4.2 Desempenho dos atuadores e automação

Durante a execução do projeto, verificou-se que o equilíbrio entre iluminação, fertirrigação e monitoramento ambiental é essencial para a condução de cultivos indoor. A presença de iluminação artificial sem fornecimento adequado de água e nutrientes pode intensificar a transpiração das plantas, favorecendo estresse hídrico, desidratação e, em situações mais severas, necrose foliar.

Nesse contexto, a automação proposta contribuiu para reduzir riscos operacionais ao permitir o acionamento programado de atuadores e o acompanhamento remoto das condições ambientais. Em sistemas aeropônicos, essa sincronização é particularmente relevante, pois as raízes dependem diretamente da nebulização da solução nutritiva para absorção de água e nutrientes (STANGHELLINI; KEMPKE, 2019b). Assim, falhas no fornecimento da solução, principalmente durante o período de iluminação ativa, podem comprometer rapidamente a vitalidade das plantas.

Entre os atuadores avaliados, a bomba de solução nutritiva apresentou uma particularidade: os arquivos exportados não preservaram o histórico real de seus acionamentos. Diante dessa limitação dos dados, o comportamento desse atuador é descrito a partir do regime operacional definido para o sistema, que orientou o seu funcionamento ao longo do período. Nesse regime, a bomba operava diariamente das 06h às 20h, em ciclos de 5 minutos desligada e 1 minuto ligada, com um acionamento adicional na madrugada, às 03h00, com duração de 1 minuto. Dessa forma, ainda que não tenha sido possível confirmar instrumentalmente cada acionamento, o regime programado permite caracterizar a intensidade de operação da fertirrigação no intervalo analisado.

Com base nessa configuração, foram estimados 140 ciclos diários durante o período principal de funcionamento e 1 ciclo adicional diário na madrugada, totalizando 141 ciclos por dia. Considerando os 32 dias do período analisado, estima-se que a bomba tenha realizado 4.512 ciclos de acionamento, correspondentes a 75 h 12 min de tempo acumulado em estado ligado.

Durante a etapa de prototipagem, foram identificadas falhas relacionadas aos componentes eletromecânicos inicialmente utilizados. Os relés de 10 A empregados no acionamento das luminárias apresentaram limitações frente aos picos de corrente no momento da energização, ocasionando soldagem dos contatos e falha dos dispositivos. Para

superar essa limitação, os relés foram substituídos por contatores, que apresentaram maior robustez para suportar a corrente de partida das luminárias.

Também foi observado problema no uso de um display LCD 16x02 com módulo I2C de marca genérica, o qual apresentou sensibilidade a ruídos elétricos e exibição incorreta das informações. A substituição por um modelo mais estável permitiu melhorar a confiabilidade da apresentação local dos dados.

Essas falhas ocorreram durante a fase de desenvolvimento e ajuste do protótipo. Após a substituição dos relés por contatores e do display por um componente mais estável, o sistema foi submetido à etapa de validação experimental, na qual operou durante o período de cultivo com os componentes corrigidos. Essa distinção é importante, pois separa os problemas típicos de prototipagem dos resultados obtidos na validação final.

A Tabela 3 apresenta indicadores utilizados para interpretar a confiabilidade operacional do sistema. Os dados de temperatura, umidade e notificações foram contabilizados a partir dos registros disponíveis, enquanto os ciclos da bomba foram estimados com base na programação operacional definida para o atuador.

Tabela 3 – Indicadores de desempenho operacional considerados na validação do sistema

<b>Indicador</b>	<b>O que demonstra</b>	<b>Resultado observado</b>
Tempo total de análise	Período considerado para avaliação dos dados ambientais e operacionais	32 dias, entre 07/05/2025 e 07/06/2025
Número de leituras ambientais válidas	Continuidade do registro de dados ambientais	2.142.570 leituras válidas de temperatura e 326.233 leituras válidas de umidade
Registros válidos de luminosidade	Validação funcional do fotoperíodo e da detecção de luz nos compartimentos	5.084.271 registros válidos, sendo 2.987.011 com luz detectada e 2.097.260 sem luz detectada
Transições de luminosidade	Registro de alterações no estado lógico dos sensores LDR	322 eventos de transição para ligado e 322 eventos de transição para desligado
Número de registros inconsistentes	Qualidade e integridade dos dados ambientais	16.368 registros inconsistentes de temperatura e 33 registros inconsistentes de umidade removidos da análise
Ciclos estimados da bomba	Confiabilidade operacional da rotina de fertirrigação programada	4.512 ciclos estimados no período analisado
Tempo acumulado de bomba ligada	Intensidade de operação da fertirrigação	75 h 12 min de acionamento acumulado estimado
Notificações de ligado	Validação do envio de alerta de estado operacional	77 notificações registradas por e-mail
Notificações de desligado	Validação do envio de alerta de indisponibilidade ou alteração de estado	77 notificações registradas por e-mail
Causa das notificações de desligamento	Diagnóstico de falhas de energia ou conectividade	Não determinada de forma individual;
Captura de imagens	Registro visual diário dos compartimentos por meio da <i>ESP32-CAM</i>	800 imagens capturadas no período analisado

Fonte: Autor (2026).

Os resultados indicam desempenho operacional adequado para uso em **ambiente de pesquisa**, especialmente pela integração entre monitoramento ambiental, automação de atuadores, notificações e registro visual. Entretanto, a ausência de histórico exportado dos acionamentos reais da bomba limita a avaliação direta desse atuador, motivo pelo qual

sua contabilização foi apresentada como estimativa baseada na programação definida no sistema.

A diferença entre o número de registros válidos de temperatura e umidade decorre da forma de armazenamento das variáveis na Arduino Cloud. Os registros eram inseridos quando havia mudança de valor; como a temperatura apresentou maior variação, especialmente em casas decimais no sensor DHT22, a série de temperatura resultou em quantidade superior de registros em relação à série de umidade. Por esse motivo, as análises foram conduzidas separadamente para cada variável, considerando apenas os registros válidos disponíveis em cada série.

### 4.3 Monitoramento ambiental das câmaras de cultivo

Durante o período experimental analisado, o sistema realizou o monitoramento das variáveis ambientais nas câmaras de cultivo. Os dados utilizados nesta análise foram exportados em formato CSV, abrangendo o intervalo de **07/05/2025 a 07/06/2025**. O tratamento dos dados, realizado em Python com apoio da biblioteca *Pandas* e *Matplotlib*, foram identificados e removidos 16.368 registros inconsistentes nas séries de temperatura e 33 registros inconsistentes nas séries de umidade. Foram considerados inconsistentes os registros fora do período de análise, valores nulos, **valores sentinela**, registros sem timestamp válido e valores incompatíveis com a escala física das variáveis monitoradas, especificamente **temperaturas inferiores a 0 °C ou superiores a 60 °C e umidade relativa inferior a 0% ou superior a 100%**. Esses registros foram desconsiderados para evitar distorções nas médias, valores mínimos, valores máximos e desvios-padrão.

A diferença entre o número de registros válidos de temperatura e umidade decorre da forma de armazenamento das variáveis na Arduino Cloud. Os registros eram inseridos quando havia mudança de valor; como a temperatura apresentou maior variação, especialmente em casas decimais no sensor DHT22, a série de temperatura resultou em quantidade superior de registros em relação à série de umidade. Por esse motivo, as análises foram conduzidas separadamente para cada variável, considerando apenas os registros válidos disponíveis em cada série.

A Tabela 4 apresenta as estatísticas descritivas das variáveis ambientais monitoradas nas cinco câmaras de cultivo.

Tabela 4 – Estatísticas descritivas de temperatura e umidade nas câmaras de cultivo

Câmara	Temp. média (°C)	Temp. mín. (°C)	Temp. máx. (°C)	DP Temp. (°C)	Umid. média (%)	Umid. mín. (%)	Umid. máx. (%)
C1	25,32	23,0	27,0	0,78	60,72	<b>42,0</b>	76,0
C2	24,89	23,0	27,0	0,81	57,14	<b>41,0</b>	74,0
C3	24,29	22,0	<b>26,0</b>	0,65	60,25	44,0	73,0
C4	24,70	23,0	<b>26,0</b>	0,59	58,82	43,0	75,0
C5	24,91	23,0	27,0	0,81	57,82	44,0	74,0

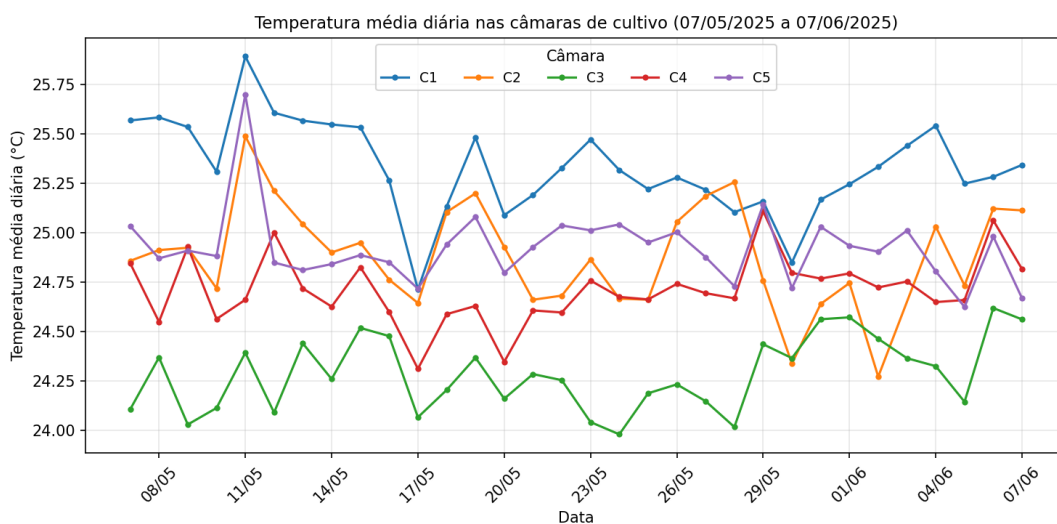
Fonte: Autor (2026).

Os resultados demonstram que a temperatura média permaneceu entre 24,29 °C e 25,32 °C nas câmaras avaliadas, 3 e 1 respectivamente. Os valores mínimos variaram entre 22,0 °C e 23,0 °C, e os valores máximos entre 26,0 °C e 27,0 °C. O desvio-padrão da temperatura variou entre 0,59 °C e 0,81 °C, indicando baixa dispersão térmica no conjunto de dados analisado.

A umidade relativa do ar apresentou médias entre 57,14% e 60,72%, com valores mínimos entre 41,0% e 44,0% e máximos entre 73,0% e 76,0%. Esses resultados indicam que, no período analisado, a umidade permaneceu em uma faixa relativamente próxima entre as câmaras, embora tenham ocorrido oscilações ao longo das séries. A variação observada reforça a importância do monitoramento contínuo, pois mudanças na umidade relativa podem influenciar a transpiração, o balanço hídrico das plantas e a demanda por irrigação.

As Figuras 14 e 15 apresentam a evolução diária das médias de temperatura e umidade relativa do ar nas câmaras de cultivo. A utilização de médias diárias permite reduzir a influência de oscilações pontuais e facilita a comparação do comportamento ambiental entre os compartimentos ao longo do período analisado.

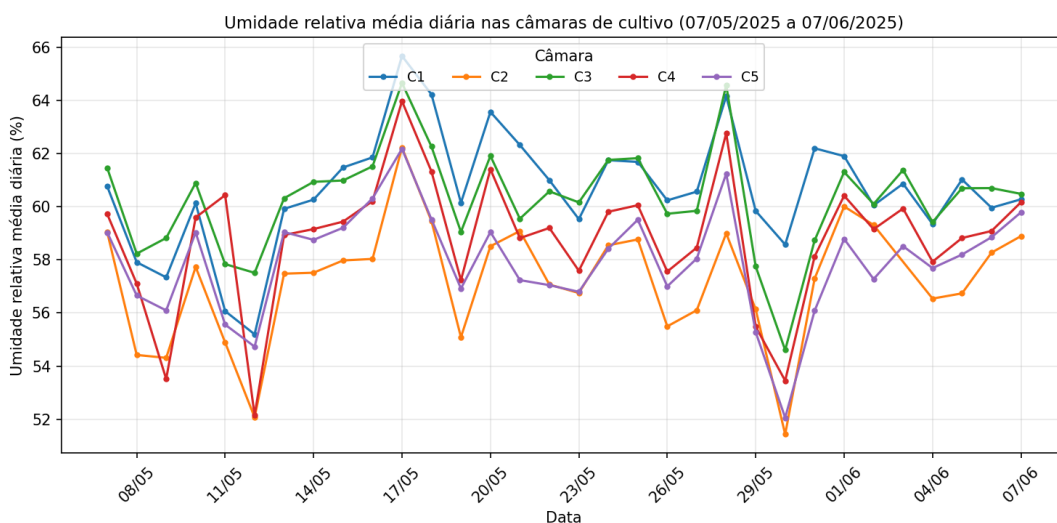
Figura 14 – Temperatura média diária nas câmaras de cultivo.



Fonte: Autor (2026).

A Figura 14 indica que as temperaturas médias diárias permaneceram em faixas próximas entre as câmaras, com variações moderadas ao longo do período. Esse comportamento reforça a estabilidade térmica geral do ambiente monitorado, embora seja possível observar diferenças entre compartimentos, especialmente entre as câmaras com maior e menor média térmica.

Figura 15 – Umidade relativa média diária nas câmaras de cultivo.

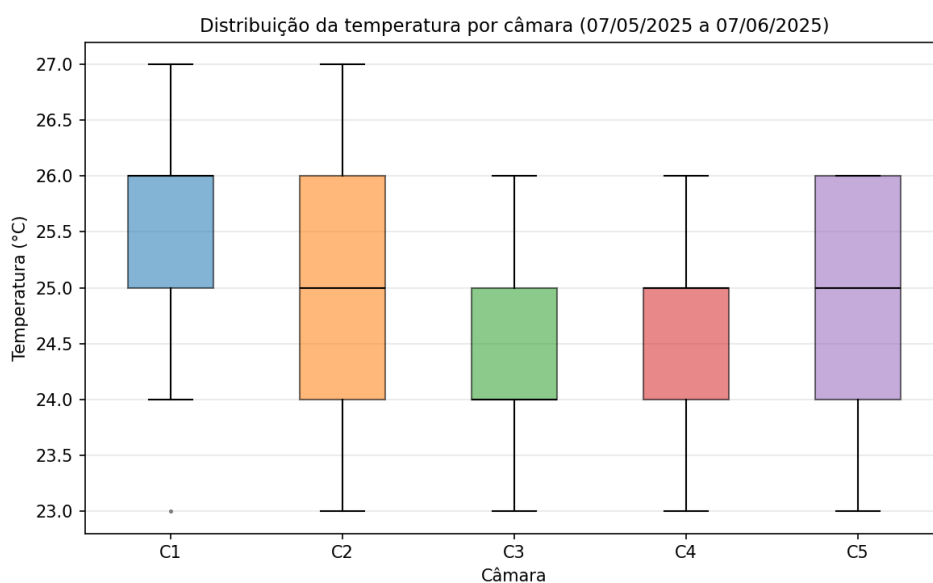


Fonte: Autor (2026).

A Figura 15 demonstra que a umidade relativa média diária também apresentou comportamento semelhante entre as câmaras, com oscilações compatíveis com a dinâmica de um ambiente de cultivo *indoor*. Essas variações podem estar associadas à evapotranspiração das plantas, aos ciclos de fertirrigação, à ventilação e às condições de circulação de ar no interior da estrutura.

Além da análise temporal, foram elaborados gráficos do tipo boxplot para avaliar a distribuição dos valores registrados em cada câmara. As Figuras 16 e 17 complementam a Tabela 4, pois permitem visualizar a dispersão, a mediana e a amplitude dos dados de forma comparativa.

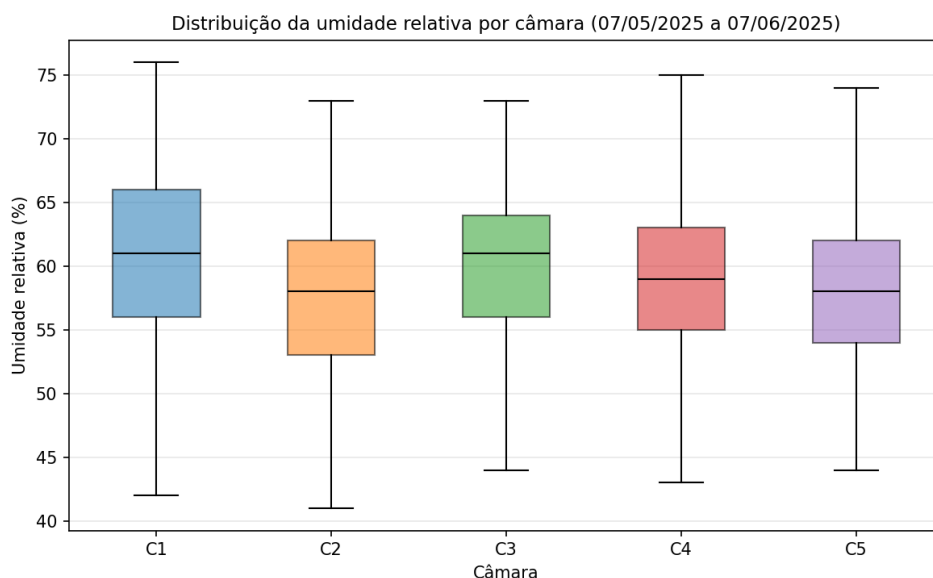
Figura 16 – Distribuição da temperatura nas câmaras de cultivo



Fonte: Autor (2026).

O boxplot de temperatura apresentado evidencia que as câmaras apresentaram dispersão reduzida, coerente com os baixos valores de desvio-padrão apresentados na Tabela 4. A Câmara 1 apresentou a maior média térmica, enquanto a Câmara 3 apresentou a menor, com diferença aproximada de 1,03 °C entre ambas.

Figura 17 – Distribuição da umidade relativa nas câmaras de cultivo.



Fonte: Autor (2026).

O boxplot de umidade relativa apresentado indica que os valores se mantiveram em faixas próximas entre as câmaras, apesar da presença de oscilações ao longo do período. Essa dispersão é esperada em ambientes de cultivo, uma vez que a umidade relativa pode variar em função dos ciclos de irrigação, da transpiração das plantas, da ventilação e da temperatura interna.

A comparação entre as câmaras indica a existência de diferenças microclimáticas dentro da estrutura vertical. No conjunto de dados analisado, a diferença entre a maior média térmica, observada na Câmara 1, e a menor média, observada na Câmara 3, foi de aproximadamente 1,03 °C. Esse resultado evidencia que, mesmo em uma estrutura compacta, podem ocorrer variações térmicas entre os compartimentos, possivelmente associadas à posição das câmaras (Figura 3b), à circulação de ar, à proximidade das fontes luminosas e à dissipação de calor pelos componentes do sistema e também devido a posição da estrutura em relação ao ar-condicionado no ambiente.

Embora discreta, a identificação dessa variação constitui um aspecto positivo do sistema, pois demonstra que a arquitetura de captura e armazenamento de dados foi capaz de registrar diferenças sutis entre os compartimentos. Em sistemas de cultivo, essa sensibilidade é especialmente relevante, uma vez que pequenas variações ambientais podem influenciar o desenvolvimento das plantas e são determinantes para a validação de resultados experimentais.

A identificação de pequenas diferenças térmicas entre os compartimentos reforça a importância do monitoramento distribuído em sistemas de agricultura vertical. Em estruturas com cultivo empilhado, a posição das câmaras, a circulação de ar e a proximidade das fontes luminosas podem favorecer a formação de microclimas distintos, mesmo em ambientes aparentemente homogêneos. Esse aspecto é especialmente relevante em pesquisas

científicas, pois variações ambientais discretas podem influenciar a transpiração, o balanço hídrico e o desenvolvimento das plantas. Assim, a presença de sensores distribuídos contribui para ampliar a precisão experimental e evitar que uma única medição ambiental represente de forma inadequada todo o sistema de cultivo.

Dessa forma, o sistema não apenas permitiu monitorar as variáveis ambientais, mas também possibilitou identificar diferenças microclimáticas entre níveis e compartimentos da estrutura. Esse aspecto representa um dos achados relevantes do experimento, pois demonstra a importância da instrumentação distribuída em sistemas verticais de cultivo, nos quais uma única medição ambiental pode não representar adequadamente todas as regiões do ambiente produtivo.

A Tabela 5 apresenta uma síntese da integridade dos dados ambientais analisados. Essa informação é relevante para contextualizar os resultados e evitar interpretações excessivamente genéricas sobre estabilidade ambiental.

Tabela 5 – Síntese da integridade dos dados ambientais analisados

<b>Aspecto analisado</b>	<b>Descrição</b>
Período de coleta analisado	07/05/2025 a 07/06/2025
Duração aproximada do período analisado	32 dias de monitoramento ambiental
Total de leituras válidas de temperatura	2.142.570 registros válidos
Total de leituras válidas de umidade	326.233 registros válidos
Registros inconsistentes identificados	16.368 registros inconsistentes nas séries de temperatura e 33 registros inconsistentes nas séries de umidade
Total de registros válidos de luminosidade	5.084.271 registros válidos, tratados como variável booleana de presença ou ausência de luz
Registros com luz detectada	2.987.011 registros, correspondentes a 58,75% do total de luminosidade
Registros sem luz detectada	2.097.260 registros, correspondentes a 41,25% do total de luminosidade
Eventos de transição de luminosidade	322 eventos de transição para ligado e 322 eventos de transição para desligado
Limitação da variável luminosidade	Os registros do LDR indicam presença ou ausência de luz, não correspondendo a medições quantitativas em lux ou PPFd
Formato dos dados analisados	Arquivos CSV contendo marcação temporal e valor registrado para cada variável
Tratamento dos dados	Realizado em Python ; remoção de valores nulos, sentinelas, registros fora do período, timestamps inválidos e valores fora da escala física das variáveis
Representação dos gráficos e estatísticas	Estatísticas calculadas a partir dos dados exportados nos arquivos CSV fornecidos para análise, considerando exclusivamente o período de 07/05/2025 a 07/06/2025

Fonte: Autor (2026).

A partir desses resultados, é possível afirmar que o sistema apresentou estabilidade operacional no período analisado, evidenciada pela continuidade dos registros válidos, pela baixa dispersão dos valores de temperatura e pela manutenção das variáveis ambientais

em faixas coerentes com o cultivo experimental. No entanto, para caracterizar estabilidade ambiental de forma ainda mais rigorosa, recomenda-se que estudos futuros incorporem procedimentos sistemáticos de calibração dos sensores, registro detalhado de eventos de desconexão e comparação com instrumentos de referência.

Além das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar, o sistema também registrou o estado de luminosidade nos cinco compartimentos de cultivo por meio de sensores LDR de 10 mm. Esses registros foram tratados como uma variável booleana, indicando presença ou ausência de luz detectada pelo sensor. Dessa forma, os dados de luminosidade não correspondem a medições quantitativas de medição quantitativa de luminosidade em lux ou PPFD, mas sim à validação funcional da presença de iluminação nos compartimentos.

No período de **07/05/2025 a 07/06/2025**, foram contabilizados 5.084.271 registros válidos de luminosidade. Desse total, 2.987.011 registros indicaram presença de luz detectada, enquanto 2.097.260 registros indicaram ausência de luz. Assim, aproximadamente 58,75% dos registros analisados apresentaram estado positivo para luminosidade, valor compatível com um fotoperíodo diário próximo de 14 horas.

A Tabela 6 apresenta a distribuição dos registros de luminosidade por câmara de cultivo, incluindo a quantidade de registros com luz detectada, sem luz detectada e os eventos de transição entre os estados ligado e desligado.

Tabela 6 – Registros de luminosidade detectados pelos sensores LDR nas câmaras de cultivo entre 07/05/2025 e 07/06/2025

Câmara	Registros	Com luz	Sem luz	% luz	% sem luz	Ligado	Desligado
C1	1.010.449	597.877	412.572	59,17	40,83	<b>62</b>	<b>62</b>
C2	1.026.540	595.071	431.469	57,97	42,03	<b>66</b>	<b>66</b>
C3	1.066.514	623.253	443.261	58,44	41,56	<b>77</b>	<b>77</b>
C4	962.681	569.159	393.522	59,12	40,88	<b>59</b>	<b>59</b>
C5	1.018.087	601.651	416.436	59,10	40,90	<b>58</b>	<b>58</b>
<b>Total</b>	<b>5.084.271</b>	<b>2.987.011</b>	<b>2.097.260</b>	<b>58,75</b>	<b>41,25</b>	<b>322</b>	<b>322</b>

Fonte: Autor (2026).

A análise dos registros de luminosidade contribuiu para validar funcionalmente o fotoperíodo implementado no sistema. Embora o sensor LDR não permita quantificar a radiação fotossinteticamente ativa, sua utilização como indicador binário de presença ou ausência de luz permitiu verificar se os compartimentos apresentaram detecção luminosa compatível com a programação das luminárias. Esse resultado dialoga com estudos sobre agricultura vertical que destacam a iluminação artificial como um dos principais fatores de controle em ambientes indoor, especialmente por sua influência sobre a fotossíntese, a fotomorfogênese e o desenvolvimento das plantas (LIMA, 2022).

Os resultados demonstram que todas as câmaras apresentaram registros consistentes de presença e ausência de luz ao longo do período analisado. A proporção geral de registros com luz detectada foi de 58,75%, enquanto os registros sem luz corresponderam a 41,25%. Essa distribuição é coerente com a lógica de fotoperíodo adotada no sistema, uma vez que o tempo diário com iluminação artificial representa parcela majoritária do ciclo de 24 horas.

Também foram identificados 322 eventos de transição para o estado ligado e 322 eventos de transição para o estado desligado, considerando a mudança do estado lógico

registrado pelos sensores LDR, com destaque para a Câmara 3, que apresentou o maior número de transições, com 77 eventos de ligado e 77 de desligado. Embora o período analisado tenha compreendido 32 dias, essa quantidade foi superior ao esperado para um acionamento exclusivamente automático e diário das luminárias. Tal comportamento esteve associado, principalmente, às intervenções manuais realizadas durante o cultivo como manutenções periódicas, retirada de flores das mudas de morango conforme a metodologia adotada pelos pesquisadores, demonstrações do funcionamento do sistema a visitantes e verificações operacionais dos compartimentos, situações em que as luminárias puderam ser acionadas ou desligadas manualmente, gerando transições adicionais nos sensores LDR. Portanto, as transições adicionais não indicam necessariamente falhas no controle de iluminação, mas refletem eventos operacionais ocorridos durante a condução experimental.

Sendo assim, os dados de luminosidade devem ser interpretados como evidência funcional da detecção de presença ou ausência de luz nos compartimentos, e não como avaliação quantitativa da radiação fotossinteticamente ativa. Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de sensores específicos de PPFD, capazes de medir a radiação efetivamente disponível para a fotossíntese, possibilitando uma análise mais precisa da uniformidade e da qualidade da iluminação no cultivo indoor.

#### 4.4 Desempenho do cultivo experimental de morango

O cultivo de morango constituiu o principal cenário de validação da operação do sistema em ambiente real de pesquisa. Ao longo dos 32 dias de acompanhamento, distribuídos entre as cinco câmaras de cultivo (**12 plantas por câmara, totalizando 60 plantas**), o sistema mostrou-se **capaz de acompanhar continuamente as condições ambientais, automatizar as rotinas de funcionamento e registrar imagens do desenvolvimento das plantas**. Esses resultados evidenciam que a arquitetura proposta operou de forma integrada e estável no contexto experimental, cumprindo as funções para as quais foi concebida.

O acompanhamento visual foi realizado por meio da *ESP32-CAM*, com cinco imagens diárias de cada câmara, registradas no período da manhã, aproximadamente às 8h. As imagens foram utilizadas apenas para documentação e acompanhamento do progresso do cultivo, não compondo análise biométrica automatizada ou avaliação quantitativa de crescimento vegetal.

Após os 32 dias de condução do experimento, foi detectada a presença de fungos nas plantas. Conforme avaliação do acompanhamento experimental, os sintomas estavam presentes desde o início do projeto, mas somente foram percebidos posteriormente. Por esse motivo, não foi possível concluir todo o ciclo de cultivo do morango como ensaio agrônomico completo. Ainda assim, durante a etapa de validação operacional não foram registradas falhas graves de irrigação ou iluminação capazes de comprometer a avaliação funcional da arquitetura IoT.

A Figura 18 apresenta registros visuais obtidos durante o cultivo. As imagens demonstram a aplicação prática do sistema como ferramenta de acompanhamento experimental, permitindo documentar visualmente o comportamento das plantas ao longo do período monitorado.

Figura 18 – Acompanhamento visual do cultivo de morango, com imagens capturadas por *ESP32-CAM*.



Fonte: Autor (2026).

A incorporação da *ESP32-CAM* ampliou a capacidade de acompanhamento do experimento, pois possibilitou o registro visual remoto das plantas e a criação de um banco de imagens. Esse recurso pode ser explorado futuramente em aplicações de visão computacional, aprendizado de máquina e análise temporal do crescimento vegetal.

Durante o período analisado, a *ESP32-CAM* foi utilizada para registrar imagens periódicas dos compartimentos de cultivo. Esse registro visual contribuiu para o acompanhamento remoto do experimento, permitindo documentar a evolução das plantas e complementar os dados ambientais obtidos pelos sensores.

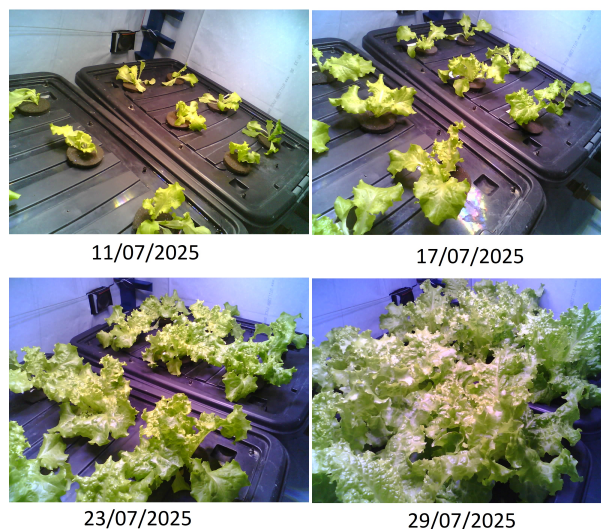
Entretanto, os dados fornecidos não incluem variáveis agrônomicas quantitativas, como massa fresca, massa seca, área foliar, número de folhas, comprimento de raízes, produtividade ou índices fisiológicos. Por esse motivo, não é possível afirmar, com base nos dados analisados, que o sistema aumentou a eficiência produtiva do cultivo. A contribuição demonstrada neste experimento está relacionada principalmente à viabilidade operacional, à estabilidade do ambiente monitorado, à automação de rotinas e ao potencial de apoio a pesquisas sobre eficiência produtiva em agricultura vertical indoor.

Essa distinção é relevante do ponto de vista científico, pois evita atribuir ao sistema efeitos produtivos que não foram mensurados experimentalmente. Assim, o cultivo de morango deve ser interpretado como uma etapa de validação funcional e operacional da plataforma, e não como um ensaio agrônomico completo de produtividade.

#### 4.5 Demonstração complementar de aplicabilidade em cultivo de alface

A aplicabilidade do sistema a outra cultura foi evidenciada por um ensaio complementar com alface, conduzido durante 45 dias em colaboração com o Professor Doutorando Rafael Carvalho de Mendonça. Ainda que de caráter complementar, esse experimento demonstrou a adaptabilidade da arquitetura proposta a uma espécie vegetal distinta, reforçando seu potencial de uso em diferentes contextos de cultivo.

Figura 19 – Experimento complementar com cultivo de alface, com imagem capturada por *ESP32-CAM*.



Fonte: Autor (2026).

A realização do teste com alface reforça o caráter modular da arquitetura proposta, pois indica que o sistema pode ser empregado em diferentes condições experimentais e culturas. No entanto, assim como no cultivo de morango, não foram disponibilizados dados biométricos ou produtivos suficientes para avaliar desempenho agrônomo de forma quantitativa.

Dessa maneira, o experimento complementar deve ser compreendido como evidência de aplicabilidade operacional do sistema, e não como comprovação de ganho produtivo. Para estudos futuros, recomenda-se a inclusão de variáveis como taxa de sobrevivência, massa fresca, massa seca, número de folhas, altura de plantas, área foliar e consumo hídrico, permitindo avaliar de forma mais robusta a relação entre automação, estabilidade ambiental e desempenho vegetal.

#### 4.6 Notificações e acompanhamento remoto

O sistema também foi avaliado quanto à capacidade de emitir notificações relacionadas ao estado de funcionamento. Durante o período analisado, foram registradas 154 notificações por e-mail, sendo 77 notificações de ligado e 77 notificações de desligado. Esses eventos indicam a capacidade do sistema de informar alterações operacionais ao usuário remoto.

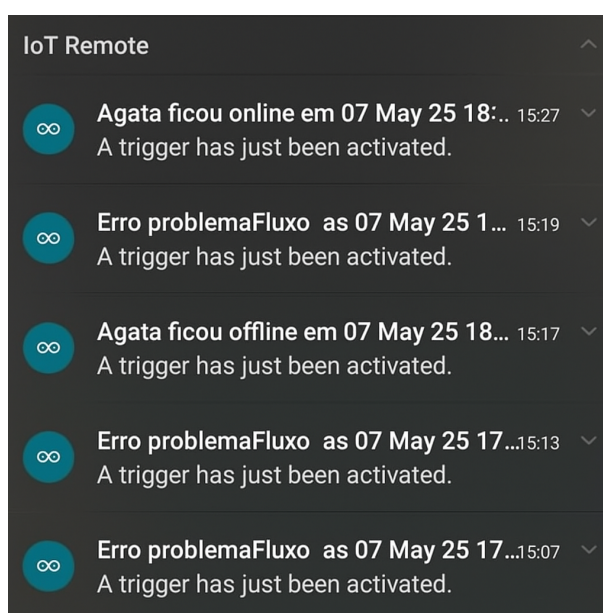
Atribuiu-se a esses registros de caráter de desconexão com o sistema ou pela queda de energia ou pela perda de conexão da internet sendo pontos a serem investigados em experimentos próximos a partir dos registros disponíveis. Conforme observado durante a execução do experimento, a maior parte das ocorrências esteve provavelmente relacionada à instabilidade da conexão via Starlink. Dessa forma, as notificações devem ser interpretadas como registros de indisponibilidade ou alteração de estado do sistema, e não como diagnóstico definitivo da causa da falha.

O envio de notificações operacionais reforça a proposta de reduzir a dependência de acompanhamento presencial contínuo, aspecto relevante em ambientes de pesquisa nos quais a intervenção humana frequente pode alterar condições internas do experimento.

Embora as notificações registradas não permitam diagnosticar individualmente se cada evento decorreu de queda de energia ou instabilidade de conexão, elas demonstram a capacidade do sistema de informar alterações de estado e apoiar respostas corretivas. Esse comportamento é coerente com aplicações IoT voltadas ao monitoramento remoto, nas quais a comunicação entre sensores, atuadores e plataformas em nuvem contribui para maior rastreabilidade e supervisão do ambiente monitorado (HENRIQUES, 2021).

A Figura 20 apresenta um exemplo de notificação emitida em aplicativo Android para indicação de erro. Esse tipo de alerta contribui para reduzir o tempo de resposta diante de falhas operacionais, permitindo que o usuário atue de forma preventiva ou corretiva.

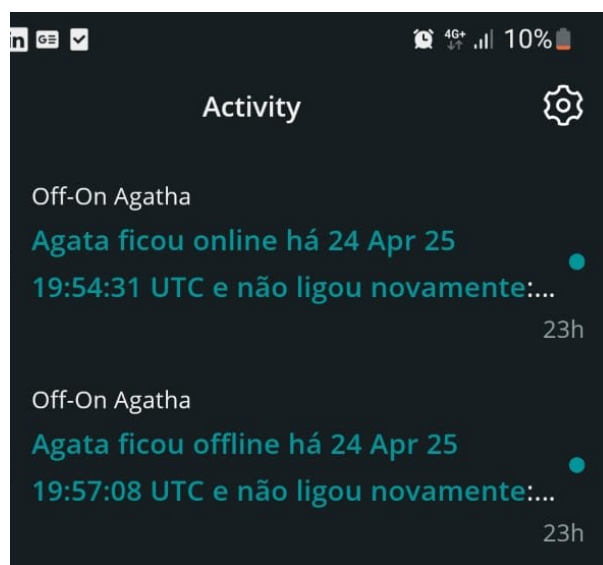
Figura 20 – Exemplo de notificação em aplicativo Android para indicação de erro no sistema. (Registro captado fora do período de validação operacional).



Fonte: Autor (2026).

A Figura 21 apresenta um exemplo de notificação relacionada à conectividade. Em sistemas dependentes de comunicação com nuvem, esse tipo de informação é importante para avaliar a disponibilidade da transmissão de dados e identificar eventuais períodos de indisponibilidade.

Figura 21 – Exemplo de notificação em aplicativo Android referente ao estado de conexão com a internet.



Fonte: Autor (2026).

Embora as notificações tenham sido validadas funcionalmente, os dados disponíveis não permitem diferenciar de forma individualizada as causas de cada evento de desligamento. Assim, a análise permite confirmar a funcionalidade do mecanismo de notificação, mas ainda não possibilita medir quantitativamente a proporção exata entre falhas decorrentes de energia elétrica e falhas decorrentes de conectividade. A inclusão de registros específicos de causa de falha em trabalhos futuros permitiria avaliar de forma mais precisa a confiabilidade da conectividade e a capacidade de recuperação automática do sistema.

#### 4.7 Limitações do sistema e melhorias futuras

Apesar dos resultados positivos observados na validação operacional, o sistema apresenta limitações que devem ser consideradas. A primeira delas refere-se à ausência de controle climático ativo. O sistema monitorou variáveis ambientais e automatizou atuadores relacionados ao cultivo, mas não realizou controle completo de temperatura e umidade por meio de estratégias como aquecimento, refrigeração, desumidificação ou umidificação controlada.

Outra limitação está relacionada ao monitoramento da solução nutritiva. Embora o manejo da solução exija atenção a parâmetros como pH e condutividade elétrica, essas variáveis não foram monitoradas automaticamente pelo sistema descrito. Portanto, o acompanhamento desses parâmetros ainda dependeu de verificação externa ou manual. A integração futura de sensores de pH e CE poderá ampliar a autonomia do sistema e melhorar o controle nutricional em experimentos de longa duração.

Também não foi incorporado sensor de vazão para confirmação do fluxo real da solução nutritiva. Em sistemas aeropônicos, a confirmação do fluxo é fundamental, pois entupimentos, vazamentos ou falhas mecânicas podem interromper a nebulização das raízes. Assim, embora o acionamento da bomba possa ser automatizado, isso não garante, por si só, que a solução esteja sendo efetivamente distribuída às plantas.

O sensor LDR utilizado permitiu detectar a presença ou ausência de luminosidade

nos compartimentos, contribuindo para a validação funcional do fotoperíodo. Entretanto, esse tipo de sensor não mede grandezas radiométricas específicas, como medição quantitativa de luminosidade em lux ou fluxo de fótons fotossinteticamente ativo. Dessa forma, para experimentos que exigem maior precisão no controle da iluminação, recomenda-se a adoção de sensores capazes de medir PPF<sub>D</sub>, possibilitando análise mais adequada da radiação efetivamente disponível às plantas.

Além disso, sensores DHT22 apresentam limitações de precisão quando comparados a instrumentos laboratoriais de maior sensibilidade. Embora sejam adequados para prototipagem e monitoramento aplicado, sua utilização em pesquisas que demandem alta precisão ambiental requer calibração periódica e, quando necessário, comparação com sensores de referência.

A dependência da rede Wi-Fi, da Arduino Cloud e da conexão via Starlink também constitui uma limitação operacional. Perdas de conexão podem afetar a transmissão dos dados, o envio de notificações e o acompanhamento remoto. Por isso, recomenda-se que versões futuras contemplem mecanismos de armazenamento local temporário, sincronização posterior e registro automático de eventos de desconexão, distinguindo falhas de energia elétrica, falhas de rede local e falhas de internet. Além disso, a utilização da Arduino Cloud envolveu a contratação de plano pago, o que caracteriza uma dependência econômica da plataforma. Em versões futuras, a adoção de soluções locais ou plataformas de código aberto pode reduzir custos recorrentes e ampliar a autonomia do sistema.

Do ponto de vista experimental, a ausência de grupo controle, de análise estatística inferencial e de variáveis produtivas das plantas limita a interpretação agrônoma dos resultados. Assim, embora o sistema tenha demonstrado viabilidade operacional e capacidade de monitoramento, ainda não é possível estabelecer relação direta entre o uso da arquitetura proposta e ganhos de produtividade vegetal.

Também permanece necessária a supervisão humana para inspeção física do sistema, especialmente para identificar vazamentos, entupimentos nos bicos nebulizadores, falhas mecânicas, desgaste de componentes eletromecânicos e necessidade de reposição da solução nutritiva. Conforme destacado por EMBRAPA (2020a), sistemas automatizados ainda demandam inspeções periódicas para garantir segurança e continuidade operacional.

Essas limitações não reduzem a contribuição do trabalho. Pelo contrário, delimitam com maior precisão o escopo da solução desenvolvida e indicam caminhos objetivos para sua evolução. Entre as principais melhorias futuras, destacam-se a integração de sensores de pH e condutividade elétrica, sensor de vazão, sensores de luminosidade com medição de PPF<sub>D</sub>, registro automático de falhas de conectividade, armazenamento local redundante, controle climático ativo e inclusão de indicadores produtivos das plantas.

## 5 CONCLUSÃO

A infraestrutura IoT desenvolvida demonstrou ser uma plataforma funcional e confiável para o monitoramento e a automação de experimentos em agricultura vertical indoor, integrando sensoriamento ambiental, armazenamento em nuvem, monitoramento visual e controle automatizado dos sistemas de cultivo. A capacidade de registrar continuamente as condições ambientais e identificar variações microclimáticas entre as câmaras reforça seu potencial para aumentar a rastreabilidade, a precisão experimental e a reprodutibilidade dos estudos conduzidos em ambientes controlados. Embora os impactos sobre o desempenho agrônomo das culturas ainda necessitem de validação, a plataforma constitui uma base tecnológica robusta e escalável para pesquisas futuras, contribuindo para o avanço da agricultura digital e dos sistemas inteligentes de produção de alimentos.

A partir dessa base, e considerando as limitações identificadas ao longo do trabalho, recomenda-se, como trabalhos futuros, a ampliação da estrutura por meio da inclusão de sensores de CO<sub>2</sub>, pH, condutividade elétrica e vazão da solução nutritiva, além da adoção de sensores de luminosidade capazes de medir PPFD. Destacam-se ainda, como possibilidades de evolução, o uso de dimerizadores automáticos para controle da intensidade da luz artificial, o controle mais refinado da ventilação, a integração de algoritmos de inteligência artificial e aprendizado de máquina para a análise dos dados ambientais e o emprego de visão computacional para o acompanhamento do crescimento e a identificação de alterações visuais nas plantas.

## Referências

- AMAZON. *ESP32*. 2026. Disponível em: <<https://www.amazon.com.br/desenvolvimento-ESP-WROOM-32-processador-microcontrolador-compat%C3%ADvel/dp/B07WCG1PLV>>. Acesso em: 02/02/2026. Citado na página 12.
- BACHIM, T. et al. Proposição de um sistema iot (internet of things) para gerenciamento de spindles em operação. In: . [S.l.: s.n.], 2020. Citado na página 6.
- Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. *Desafios para a implementação da Agricultura 4.0 no Brasil*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022. <<https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/blogdodesenvolvimento/detalhe/Desafios-para-a-implementacao-da-agricultura-4.0-no-Brasil/>>. Acesso em: 15 set. 2025. Citado na página 6.
- BELISTA, F. C. L. et al. A smart aeroponic tailored for iot vertical agriculture using network connected modular environmental chambers. In: IEEE. *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*. [S.l.], 2018. p. 1–4. Citado na página 5.
- Brasil. Ministério da Agricultura e Pecuária – MAPA. *Produtividade da agropecuária cresce 3,36% ao ano*. 2024. <<https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/noticias/produtividade-da-agropecuaria-cresce-3-36-ao-ano>>. Acesso em: 15 set. 2025. Citado na página 6.
- DESTEFANI, W. C. et al. Mudanças climáticas e seus impactos nos setores agropecuários. *Revista de Geopolítica*, v. 16, n. 5, p. e992–e992, 2025. Citado na página 1.
- DREAMSTIME.COM, V. . *Aquaponia, hidroponia e aeroponia*. 2026. Disponível em: <<https://pt.dreamstime.com/hidroponia-e-aeroponia-aquap%C3%B3nicas-como-diagrama-esquem%C3%A1tico-dos-sistemas-de-cultivo-lista-rotulada-com-v%C3%A1rias-t%C3%A9cnicas-image280477758>>. Acesso em: 02/02/2026. Citado na página 4.
- EMBRAPA. *Agricultura digital: pesquisa, desenvolvimento e inovação nas cadeias produtivas*. Brasília: EMBRAPA, 2020. Citado na página 37.
- EMBRAPA. *Internet das Coisas na Agricultura: Aplicações e Perspectivas*. São Carlos,SP: [s.n.], 2020. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/solos/iot-na-agricultura>>. Acesso em: 29 out. 2025. Citado na página 7.
- ESTADÃO. *Fazenda conectada tem produtividade 18% maior que média nacional*. 2023. <<https://www.estadao.com.br/economia/agronegocios/brasil-agricultura-40-tecnologia-lavouras/>>. Acesso em: 15 set. 2025. Citado na página 6.
- FRANCA, M. T. A. d. *Estudo da aplicação de iluminação artificial em um modelo de plantio vertical*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2022. 94 f. Dissertação de Mestrado em Tecnologias Computacionais para o Agronegócio. Citado na página 1.

- HENRIQUES, L. F. A. Implementação e monitoramento de um sistema de irrigação automatizado em iot utilizando módulo esp32 em plantio caseiro. Manaus, 2021. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Amazonas. Citado 4 vezes nas páginas 5, 6, 7 e 35.
- HUH, J.-H. Projeto baseado em plc de sistema de monitoramento para piscicultura vertical integrada com tic. *Human-centric Computing and Information Sciences*, v. 7, n. 1, p. 1–19, 2017. Citado na página 6.
- JESUS, K. d.; SILVA, R. F. d.; VIEIRA, C. C. F. Aplicação de internet das coisas (iot) na agricultura de precisão. 2021. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 24.
- LIMA, I. H. A. *A manipulação da qualidade da luz associada à UV-B melhora a fotossíntese e os teores de rutina em microtomateiro cultivado em agricultura vertical*. Dissertação (Mestrado) — Instituto Federal Goiano, Brasil, 2022. Citado 3 vezes nas páginas 1, 4 e 31.
- MACEDO, E. d. F. S.; JÚNIOR, N. N. A importância do planejamento logístico com foco no crescimento da demanda da cadeia produtiva de alimentos até 2050. *Refas-Revista Fatec Zona Sul*, v. 3, n. 3, p. 31–45, 2017. Citado na página 1.
- PLETSCH, A. L. B.; STENGER, E. A. F.; SEHNEM, S. The potential of industry 4.0 technologies in transforming agricultural and livestock practices: a systematic review. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, Emerald Publishing Limited, v. 21, n. 2, p. 121–155, 2025. Citado na página 3.
- SABRY, F. *Agricultura Vertical: Como devemos alimentar mais três bilhões de pessoas até 2050?* [S.l.]: One Billion Knowledgeable, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 1 e 4.
- Springer. How strong are the environmental and yield benefits of precision agriculture? 2024. Acesso em: 15 set. 2025. Citado na página 6.
- STANGHELLINI, C.; KEMPKES, F. L. K. Aeroponics: a modern technology for cultivation of horticultural crops. *Acta Horticulturae*, International Society for Horticultural Science (ISHS), v. 1273, p. 177–184, 2019. Citado na página 4.
- STANGHELLINI, C.; KEMPKES, F. L. K. *Plant Factory: Closed Systems for Plant Production*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers, 2019. Citado na página 24.
- VARELLA, W. A. et al. Arquitetura de serviços integrada para promover a economia circular na agricultura 4.0. 2022. Citado 2 vezes nas páginas 3 e 24.

## Apêndices

## APÊNDICE A – Código-fonte completo do ESP32

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <time.h>
3  #include "thingProperties.h"
4  #include <Adafruit_GFX.h>
5  #include <Adafruit_ST7735.h>
6  #include <SPI.h>
7
8  // ==== Definicoes de Pinos ====
9
10 #define FLOW_SENSOR_PIN 5 // Pino conectado ao sinal do sensor de
    fluxo
11
12
13 #define RELAY_PIN_1 4
14 #define RELAY_PIN_2 4
15 #define RELAY_PIN_3 4
16 #define RELAY_PIN_4 4
17 #define RELAY_PIN_5 4
18 #define RELAY_PIN_6 19 // Atencao: Verificar conflito com os
    pinos 4 acima
19
20 #define TFT_CS 15
21 #define TFT_RST 4
22 #define TFT_DC 2
23
24 // ==== Constantes ====
25 #define INTERVAL_ON 60000 // 1 minuto
26 #define INTERVAL_OFF 300000 // 5 minutos
27
28 #define HORA_INICIAL_CICLO 6 // maior igual
29 #define HORA_FINAL_CICLO 22 // menor que
30
31
32 // Variaveis globais de erro
33
34 unsigned long tempoLigouBomba = 0; //variavel para compensar
    atraso na alteracao de valor do status de fluxo
35 unsigned long tempoErroLuminarias = 0;
36 unsigned long tempoErroFluxoAtivado = 0;
37 unsigned long tempoUltimoProblemaFluxo = 0;
38
39 // ==== Objetos Globais ====
40
41 unsigned long ultimoTempo_Sensor_Fluxo = 0;
42
43 const char* ntpServer = "0.br.pool.ntp.org";
44 const long gmtOffset_sec = -3 * 3600;
45 const int daylightOffset_sec = 0;
46
47 Adafruit_ST7735 tft = Adafruit_ST7735(TFT_CS, TFT_DC, TFT_RST);
48 struct tm timeinfo;
49
50 unsigned long previousTimeSyncMillis = 0;
51 unsigned long previousRelay6Millis = 0;

```

```
52 unsigned long previousMidnightRelayMillis = 0;
53 bool relayState = false;
54
55 unsigned long manualStartMillis = 0;
56 const unsigned long MAX_MANUAL_DURATION = 3600000; // 1 hora
57
58 void IRAM_ATTR fluxoInterrompido() {
59     ultimoTempo_Sensor_Fluxo = millis();
60 }
61
62 // ==== Setup ====
63 void setup() {
64     Serial.begin(115200);
65     pinMode(FLOW_SENSOR_PIN, INPUT_PULLUP);
66     attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(FLOW_SENSOR_PIN),
67                     fluxoInterrompido, FALLING);
68
69     // Inicializar tela
70     tft.initR(INITR_BLACKTAB);
71     tft.setRotation(3);
72     tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
73     tft.setTextColor(ST77XX_WHITE, ST77XX_BLACK);
74     tft.setTextSize(1);
75     tft.setCursor(0, 0);
76     tft.print("Conectando a Rede");
77
78     // Conectar ao Wi-Fi
79     WiFi.begin("STARLINK_2", "1fg01@n02024st@rlink");
80
81     unsigned long wifiStartTime = millis();
82
83     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
84         if (millis() - wifiStartTime >= 300000) { // 5 minutos
85             Serial.println("Falha ao conectar ao WiFi em 5 minutos.
86                 Reiniciando ESP...");
87             tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
88             tft.setCursor(0, 0);
89             tft.print("Erro WiFi. Reiniciando...");
90             delay(3000);
91             ESP.restart();
92         }
93
94         tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
95         tft.setCursor(0, 0);
96         tft.print("Conectando a Rede..");
97         delay(1000);
98         Serial.println("Conectando ao WiFi..");
99
100
101     tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
102     tft.setCursor(0, 0);
103     tft.print("Conectado");
104     tft.setCursor(125, 0);
105     tft.print("Off");
106
107     // Configuracao dos Reles
108     pinMode(RELAY_PIN_1, OUTPUT);
```

```
109   pinMode(RELAY_PIN_2, OUTPUT);
110   pinMode(RELAY_PIN_3, OUTPUT);
111   pinMode(RELAY_PIN_4, OUTPUT);
112   pinMode(RELAY_PIN_5, OUTPUT);
113   pinMode(RELAY_PIN_6, OUTPUT);
114
115   digitalWrite(RELAY_PIN_1, HIGH);
116   digitalWrite(RELAY_PIN_2, HIGH);
117   digitalWrite(RELAY_PIN_3, HIGH);
118   digitalWrite(RELAY_PIN_4, HIGH);
119   digitalWrite(RELAY_PIN_5, HIGH);
120   digitalWrite(RELAY_PIN_6, HIGH);
121
122   // Configuracao do tempo
123   configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
124   while (!getLocalTime(&timeinfo)) {
125       tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
126       tft.setCursor(0, 0);
127       tft.print("Aguardando sincronizacao..");
128       delay(1000);
129   }
130
131   updateLocalTime();
132   tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
133
134   // Inicializar Arduino Cloud
135   initProperties();
136   ArduinoCloud.begin(ArduinoIoTPreferredConnection);
137   ArduinoCloud.addCallback(ArduinoIoTCloudEvent::CONNECT,
138                           doThisOnConnect);
139   ArduinoCloud.addCallback(ArduinoIoTCloudEvent::DISCONNECT,
140                           doThisOnDisconnect);
141   setDebugMessageLevel(2);
142   ArduinoCloud.printDebugInfo();
143   modo = true;
144   ligarBomba = false;
145   ligarLuminaria = false;
146   problemaFluxoNotificacao = false;
147
148   tft.setCursor(0, 118);
149   tft.setTextSize(1);
150   tft.print("Modo: ");
151   tft.print(modo ? "Automatico" : "Manual    ");
152 }
153
154 // ==== Loop Principal ====
155 void loop() {
156   ArduinoCloud.update();
157   fluxoDetectado = (millis() - ultimoTempo_Sensor_Fluxo < 1000);
158   configTime(gmtOffset_sec, daylightOffset_sec, ntpServer);
159
160   unsigned long currentMillis = millis();
161
162   // Sincronizacao de tempo a cada 4 minutos
163   if (currentMillis - previousTimeSyncMillis >= 240000) {
164       previousTimeSyncMillis = currentMillis;
165       updateLocalTime();
166   }
```

```
166
167 // Obter hora atual
168 time_t now;
169 time(&now);
170 localtime_r(&now, &timeinfo);
171 int hour = timeinfo.tm_hour;
172 int minute = timeinfo.tm_min;
173
174 // Mostrar hora
175 tft.setTextColor(ST77XX_WHITE, ST77XX_BLACK);
176 tft.setTextSize(1);
177 tft.setCursor(0, 0);
178 tft.print((hour < 10 ? "0" : "") + String(hour) + ":" + (minute
    < 10 ? "0" : "") + String(minute));
179
180
181 // Mostrar sensores
182 displaySensorData();
183
184
185
186 // Controle dos Reles
187 if (modo) {
188     handleRelays(currentMillis, hour, minute);
189 } else {
190     if (manualStartMillis == 0) manualStartMillis = millis(); //
        Inicia o cronometro
191
192     if (millis() - manualStartMillis > MAX_MANUAL_DURATION) {
193         modo = true;
194         ligarBomba = false;
195         ligarLuminaria = false;
196         Serial.println("Tempo do modo manual expirado. Retornando
            ao modo automatico.");
197     } else {
198         digitalWrite(RELAY_PIN_6, ligarBomba ? LOW : HIGH); //
            Motor
199         digitalWrite(RELAY_PIN_1, ligarLuminaria ? LOW : HIGH);
200         digitalWrite(RELAY_PIN_2, ligarLuminaria ? LOW : HIGH);
201         digitalWrite(RELAY_PIN_3, ligarLuminaria ? LOW : HIGH);
202         digitalWrite(RELAY_PIN_4, ligarLuminaria ? LOW : HIGH);
203         digitalWrite(RELAY_PIN_5, ligarLuminaria ? LOW : HIGH);
204         motor = digitalRead(RELAY_PIN_6) == LOW;
205     }
206 }
207
208 delay(500);
209
210 }
211
212 // ==== Funcoes Auxiliares ====
213
214 void updateLocalTime() {
215     time_t now;
216     time(&now);
217     localtime_r(&now, &timeinfo);
218 }
219
220 void doThisOnConnect() {
```

```
221   Serial.println("Conectado a Arduino IoT Cloud");
222   tft.setCursor(126, 0);
223   tft.setTextSize(1);
224   tft.print("On ");
225 }
226
227 void doThisOnDisconnect() {
228   Serial.println("Desconectado da Arduino IoT Cloud");
229   tft.setTextSize(1);
230   tft.setCursor(125, 0);
231   tft.print("Off");
232 }
233
234 void displaySensorData() {
235   char buffer[10];
236   tft.setTextSize(2);
237
238   tft.setCursor(0, 20);
239   tft.print("C1:");
240   dtostrf(temperatura15, 4, 1, buffer);
241   tft.print(buffer); tft.print("C|"); tft.print(umidade15); tft.
      print("%");
242
243   tft.setCursor(0, 38);
244   tft.print("C2:");
245   dtostrf(temperatura14, 4, 1, buffer);
246   tft.print(buffer); tft.print("C|"); tft.print(umidade14); tft.
      print("%");
247
248   tft.setCursor(0, 56);
249   tft.print("C3:");
250   dtostrf(temperatura13, 4, 1, buffer);
251   tft.print(buffer); tft.print("C|"); tft.print(umidade13); tft.
      print("%");
252
253   tft.setCursor(0, 74);
254   tft.print("C4:");
255   dtostrf(temperatura12, 4, 1, buffer);
256   tft.print(buffer); tft.print("C|"); tft.print(umidade12); tft.
      print("%");
257
258   tft.setCursor(0, 92);
259   tft.print("C5:");
260   dtostrf(temperatura16, 4, 1, buffer);
261   tft.print(buffer); tft.print("C|"); tft.print(umidade16); tft.
      print("%");
262 }
263
264 void handleRelays(unsigned long currentMillis, int hour, int
      minute) {
265   if (hour >= HORA_INICIAL_CICLO && hour < HORA_FINAL_CICLO) {
266     // Ligar reles 1 a 5
267     for (int i = 1; i <= 5; i++) digitalWrite(RELAY_PIN_1, LOW);
268
269     // Controle ciclico do rele 6 (ligarBomba)
270     if (!relayState && currentMillis - previousRelay6Millis >=
          INTERVAL_OFF) {
271       relayState = true;
272       motor = true;
```

```
273     digitalWrite(RELAY_PIN_6, LOW);
274     tempoLigouBomba = currentMillis;
275     tft.fillScreen(ST77XX_BLACK);
276     previousRelay6Millis = currentMillis;
277     tft.setCursor(0, 118);
278     tft.setTextSize(1);
279     tft.print("Modo: ");
280     tft.print(modo ? "Automatico" : "Manual    ");
281 } else if (relayState && currentMillis - previousRelay6Millis
           >= INTERVAL_ON) {
282     relayState = false;
283     motor = false;
284     digitalWrite(RELAY_PIN_6, HIGH);
285     previousRelay6Millis = currentMillis;
286 }
287 verificarErros(currentMillis, hour, minute);
288 } else {
289     // Desligar todos os reles
290     for (int i = 1; i <= 5; i++) digitalWrite(RELAY_PIN_1, HIGH);
291     digitalWrite(RELAY_PIN_6, HIGH);
292     motor = false;
293 }
294
295 // Acionamento do rele 6 as 03:00 por 1 minuto
296 if (hour == 3 && minute == 0 && currentMillis -
     previousMidnightRelayMillis >= INTERVAL_ON) {
297     previousMidnightRelayMillis = currentMillis;
298     digitalWrite(RELAY_PIN_6, LOW);
299     delay(120000);
300     digitalWrite(RELAY_PIN_6, HIGH);
301 }
302 }
303
304 void onModoChange() {
305     Serial.print("Modo alterado para: ");
306     Serial.println(modo ? "Automatico" : "Manual");
307     tft.setCursor(0, 118);
308     tft.setTextSize(1);
309     tft.print("Modo: ");
310     tft.print(modo ? "Automatico" : "Manual    ");
311
312     if (modo) {
313         // Resetar variaveis ao mudar para automatico
314         ligarBomba = false;
315         ligarLuminaria = false;
316         manualStartMillis = 0;
317     } else {
318         // Iniciar contagem de tempo em modo manual
319         manualStartMillis = millis();
320     }
321 }
322
323
324
325 void verificarErros(unsigned long currentMillis, int hour, int
     minute) {
326     // === 1. Verificacao de LUMINARIAS ===
327     bool periodoLuzAtivo = (hour >= HORA_INICIAL_CICLO && hour <
         HORA_FINAL_CICLO);
```

```
328     bool relaysLuzLigados = digitalRead(RELAY_PIN_1) == LOW;
329
330     if (modo && periodoLuzAtivo && relaysLuzLigados) {
331         problemaLuminarias = true;
332         tempoErroLuminarias = currentMillis;
333     }
334
335     if (problemaLuminarias && (currentMillis - tempoErroLuminarias
336         > 5000)) {
337         problemaLuminarias = false;
338     }
339
340     // === 2. Verificacao de FLUXO ===
341     bool bombaLigada = digitalRead(RELAY_PIN_6) == LOW;
342
343     if (modo && bombaLigada && hour >= HORA_INICIAL_CICLO && hour
344         <= HORA_FINAL_CICLO) {
345         // Se nao houve fluxo detectado nos ultimos 15 minutos
346         if ((millis() - ultimoTempo_Sensor_Fluxo) > 900000) {
347             problemaFluxo = true;
348             problemaFluxoNotificacao = true;
349             tempoErroFluxoAtivado = currentMillis;
350         } else {
351             problemaFluxo = false;
352         }
353     } else {
354         problemaFluxo = false;
355     }
356
357     // // Se a bomba estiver ligada, motor == false, passou 5
358     // minutos desde ultimo erro e se passou 5 segundos desde que a
359     // bomba foi ativada
360     // if (modo && (currentMillis - tempoLigouBomba > 5000) &&
361     //     bombaLigada && motor == false) {
362     //     if ((currentMillis - tempoUltimoProblemaFluxo) > 180000 &&
363     //         !problemaFluxo) {
364     //         problemaFluxo = true;
365     //         tempoErroFluxoAtivado = currentMillis;
366     //         tempoUltimoProblemaFluxo = currentMillis;
367     //     }
368     // }
369
370     // Desativa o alerta visual apos 5 segundos
371     if (problemaFluxoNotificacao && (currentMillis -
372         tempoErroFluxoAtivado > 5000)) {
373         problemaFluxoNotificacao = false;
374     }
375 }
```