Artigo Completo

HortaTech: uma arquitetura IoT baseada em rede CAN, LoRa e supervisão em nuvem para monitoramento agrícola

HortaTech: an IoT Architecture Based on CAN Network, LoRa, and Cloud Supervision for Agricultural Monitoring

Pedro Henrique Ferreira Amorim da Silva [Universidade Federal do Vale do São Francisco | *pedrohenriquefa97@gmail.com*]
Jadsonlee da Silva Sá [Universidade Federal do Vale do São Francisco | *jadsonlee.sa@univasf.edu.br*]

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

Resumo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento, a implementação e a validação experimental em bancada de um sistema de monitoramento para apoio ao manejo hídrico no cultivo de pimentão, com foco em aplicações de agricultura de precisão e Internet das Coisas (IoT). O sistema foi concebido a partir de uma arquitetura distribuída e modular, composta por nós sensores baseados em microcontroladores PIC, comunicação local por rede CAN, transmissão sem fio de longa distância por LoRa e integração com uma plataforma web em nuvem. A aquisição das variáveis ambientais e edáficas foi realizada por sensores de temperatura do solo, umidade do solo, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Os dados coletados pelos nós foram enviados ao barramento CAN, retransmitidos por um *gateway* CAN/LoRa, processados em uma estação base com *backend* em Node.js e armazenados no *Firebase Realtime Database*, sendo posteriormente visualizados em uma interface desenvolvida em Vue.js. Os testes demonstraram a operação integrada do fluxo de dados ponta a ponta, com comunicação CAN configurada em 250 kbps, enlace LoRa validado entre 150 m e 200 m, *payload* médio de aproximadamente 32 *bytes* e taxa efetiva LoRa estimada em 5,4 kbps. O tempo médio de resposta entre a aquisição da leitura e a atualização no *dashboard* permaneceu na faixa de 1,5 s a 2,0 s, enquanto o envio periódico das leituras permitiu o acompanhamento contínuo do microclima e das condições do solo. Embora o protótipo atual tenha sido validado principalmente como plataforma de monitoramento, a arquitetura proposta mostrou-se tecnicamente viável, escalável e preparada para futura integração de válvulas solenoides, sensores de fluxo e estratégias automáticas de irrigação.

Abstract. This paper presents the development, implementation, and bench-level experimental validation of a monitoring system to support water management in bell pepper cultivation, focusing on precision agriculture and Internet of Things (IoT) applications. The system was designed as a distributed and modular architecture composed of PIC-based sensor nodes, local communication through a CAN network, long-range wireless transmission using LoRa, and integration with a cloud-based web platform. Environmental and soil-related variables were acquired using sensors for soil temperature, soil moisture, ambient temperature, and relative air humidity. The data collected by the nodes were transmitted over the CAN bus, forwarded by a CAN/LoRa gateway, processed at a base station using a Node.js backend, stored in the Firebase Realtime Database, and displayed through a Vue.js web interface. The tests demonstrated the integrated end-to-end operation of the data flow, with the CAN network configured at 250 kbps, the LoRa link validated over distances between 150 m and 200 m, an average payload of approximately 32 *bytes*, and an estimated LoRa effective data rate of 5.4 kbps. The average response time from data acquisition to dashboard update remained within the range of 1.5 s to 2.0 s, while the periodic transmission of readings enabled continuous monitoring of microclimate and soil conditions. Although the current prototype was mainly validated as a monitoring platform, the proposed architecture proved to be technically feasible, scalable, and suitable for future integration of solenoid valves, flow sensors, and automatic irrigation strategies.

Palavras-chave: Agricultura, sensores, wireless LoRa, rede CAN, sistema web, cultivo de hortaliças

Keywords: Agriculture, sensors, wireless LoRa, CAN network, web system, vegetable cultivation

Recebido/Received: 15 02 2026 • **Aceito/Accepted:** 08 07 2026 • **Publicado/Published:** 15 10 2026

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

1 Introdução

O agronegócio tem se consolidado na economia brasileira, sendo ele o responsável por elevar o PIB do país, que em 2023 representou 23,8%, de acordo com dados calculados pelo Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada(Cepea/Esalq/USP) em parceria com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA) [CEPEA/ESALQ-USP, 2024].

Dentre as áreas do agronegócio, a que mais vem chamando a atenção dos investidores é a agricultura, sendo responsável por 43,2% das exportações, segundo dados realizado pela Embrapa no ano de 2019 [Embrapa, 2019]. Os avanços tecnológicos na área da agricultura têm ajudado os agricultores no desenvolvimento, porém, tendo em vista a necessidade de altos investimentos muitos agricultores não conseguem acompanhar o mercado, isso faz com que exista um grande

desequilíbrio estrutural entre eles.

Um dos principais desafios que atingem os produtores rurais é a gestão ineficiente dos recursos hídricos, o que resulta em um desperdício significativo de água e compromete a sustentabilidade da produção. Estima-se que 50% desta água não é aproveitada pelas plantas por conta de sistemas inadequados de irrigação ou vazamentos nas tubulações, com grande desperdício de energia e trabalho [Marouelli *et al.*, 2011].

Com o avanço da tecnologia, equipamentos foram criados para minimizar esses prejuízos e maximizar o aproveitamento dos recursos disponíveis. Dentre estes equipamentos, destaca-se o sistema de irrigação, onde a técnica por gotejamento se mostra bastante benéfico para a agricultura em geral.

Diante deste cenário, a resposta para a crescente demanda por alimentos e sustentabilidade reside na adoção de tecnologias inovadoras. É aqui que surge o conceito de Agricultura 4.0 [Pereira *et al.*, 2023], que utiliza a Internet das Coisas (IoT), sensores e automação para criar sistemas de produção inteligentes e baseados em dados [Duraes *et al.*, 2022]. Ambientes controlados, como as estufas para cultivo de hortaliças, representam o campo de provas ideal para essas tecnologias, pois permitem maximizar a eficiência de recursos de forma precisa [Elijah *et al.*, 2018].

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver, implementar e validar experimentalmente, em ambiente de bancada, um sistema IoT para monitoramento de variáveis ambientais e edáficas associadas ao cultivo de pimentão. A proposta busca integrar uma rede local de sensoriamento baseada em CAN, comunicação sem fio de longo alcance por LoRa, uma estação base para processamento dos dados e uma plataforma web em nuvem para armazenamento, visualização e acompanhamento das medições.

Diferentemente de soluções baseadas apenas em sensores isolados ou em comunicação sem fio direta, a arquitetura proposta combina uma rede local robusta, adequada à interligação de múltiplos nós sensores, com um enlace LoRa para transmissão dos dados até uma estação de supervisão. Essa abordagem permite separar a comunicação de campo, realizada em uma rede cabeada e tolerante a ruídos, da comunicação de maior alcance, voltada ao envio das informações para processamento e visualização.

As principais contribuições deste trabalho são:

- desenvolvimento de uma arquitetura distribuída e modular para monitoramento agrícola, integrando nós sensores, rede CAN, comunicação LoRa e plataforma em nuvem;
- implementação de nós sensores baseados em microcontroladores PIC para aquisição de variáveis de solo e ambiente, incluindo temperatura do solo, umidade do solo, temperatura ambiente e umidade relativa do ar;
- integração de um *gateway* CAN/LoRa e de uma estação base com *backend* em Node.js para recepção, validação, processamento e envio dos dados ao *Firebase Realtime Database*;
- desenvolvimento de uma aplicação web em Vue.js para autenticação, supervisão e visualização das medições por meio de cartões informativos e gráficos históricos;
- validação experimental do fluxo de dados ponta a ponta, incluindo a análise de métricas como taxa de comunicação CAN, alcance do enlace LoRa, tamanho médio do *payload* e tempo de resposta da interface.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 apresenta a fundamentação e as tecnologias aplicadas ao trabalho, incluindo aspectos relacionados ao cultivo, à irrigação, à Agricultura 4.0, à rede CAN, à comunicação LoRa e às plataformas de supervisão. A Seção 3 descreve a arquitetura e a implementação do sistema proposto. A Seção 4 apresenta os resultados experimentais, a discussão das métricas obtidas e as limitações do estudo. Por fim, a Seção 5 apresenta as considerações finais e indica possibilidades de trabalhos futuros.

2 Fundamentação e Tecnologias Aplicadas

Esta seção apresenta os principais conceitos agronômicos e tecnológicos que fundamentam o desenvolvimento do sistema proposto. Inicialmente, são discutidos aspectos relacionados ao ambiente de cultivo, ao solo, à irrigação por gotejamento e à cultura do pimentão, uma vez que essas características orientam a escolha das variáveis monitoradas. Em seguida, são abordadas as tecnologias habilitadoras associadas à Agricultura 4.0, incluindo redes de comunicação, sensoriamento, conectividade de longo alcance e plataformas de supervisão. Dessa forma, busca-se estabelecer a base conceitual necessária para compreender a arquitetura e a implementação apresentadas nas seções seguintes.

2.1 Ambiente de Cultivo e Solo

O sucesso da atividade agrícola é intrinsecamente dependente das características do ambiente de cultivo. Oscilações na temperatura e umidade podem comprometer o desenvolvimento da cultura, ocasionando malformações, perdas na produção e maior incidência de pragas e doenças, o que torna a análise e mitigação desses parâmetros essenciais [Furrier and Ross, 2004]. Neste estudo, utilizou-se como ambiente de cultivo recipientes agrícolas (vasos) contendo a espécie de pimentão.

Nesse contexto, a estufa agrícola destaca-se como um ambiente controlado que permite o manejo preciso de variáveis climáticas, irrigação e umidade, adequando-se às necessidades específicas de hortaliças. Além de oferecer proteção contra insetos-praga e viabilizar o plantio fora de época, o cultivo protegido reduz significativamente a perda de nutrientes nitrogenados por volatilização — que pode chegar a 50% em campo aberto, aumentando a eficiência dos fertilizantes, a lucratividade e a sustentabilidade ambiental [Pereira *et al.*, 2023].

Concomitantemente, a escolha adequada do solo é determinante para a eficiência e sanidade do crescimento vegetal [Souza, 2017]. Características físicas do solo influenciam diretamente o manejo da irrigação; o sistema de gotejamento, embora aplicável a diversos tipos de solo, é particularmente indicado para solos densos e compactos com baixa taxa de infiltração, pois permite a absorção lenta da água [Matias, 2021]. Ademais, o monitoramento da temperatura do solo é uma métrica vital, pois impacta as propriedades biológicas,

químicas e físicas, favorecendo a proliferação de microrganismos benéficos ao cultivo.

2.2 Irrigação por Gotejamento

A irrigação por gotejamento define-se pela aplicação pontual e frequente de água diretamente na zona radicular da planta, utilizando emissores denominados gotejadores dispostos estrategicamente ao longo da extensão do cultivo [Souza and Matsura, 2004]. Diferente dos métodos de superfície ou aspersão, esta técnica fundamenta-se na manutenção de um bulbo úmido constante no solo, o que permite que a planta mantenha seu potencial hídrico otimizado sem a necessidade de ciclos de estresse hídrico entre as regas.

Este método assume relevância estratégica diante do cenário de escassez hídrica global, destacando-se como um recurso de alta eficiência (podendo atingir índices superiores a 90%) que adequa a oferta hídrica às necessidades específicas da cultura. Ao reduzir as perdas por evaporação direta do solo e eliminar a deriva causada pelo vento, o sistema minimiza o desperdício e mitiga impactos ambientais negativos, como a lixiviação de nutrientes para o lençol freático [Pereira *et al*., 2023].

Além disso, ao operar com baixa vazão e alta frequência, o sistema proporciona um controle rigoroso sobre o manejo da água e da fertilidade — técnica conhecida como fertirrigação. Esse monitoramento preciso previne o alagamento e a consequente hipóxia radicular, protegendo a estrutura física do solo contra a degradação e a erosão [Souza and Matsura, 2004]. No contexto da agricultura de precisão, o gotejamento torna-se a infraestrutura ideal para a integração de sensores de umidade e temperatura do solo, permitindo uma automação baseada em dados reais que maximiza a produtividade por gota aplicada.

2.3 A Cultura do Pimentão

O pimentão destaca-se como uma das hortaliças de maior importância econômica na olericultura, sendo a espécie escolhida para este projeto devido ao seu ciclo biológico dinâmico e rápido desenvolvimento. Essa característica é fundamental para experimentações tecnológicas, pois permite observar a resposta da planta a diferentes estímulos hídricos em um curto intervalo de tempo, facilitando a coleta e análise de dados de crescimento.

Além da agilidade no desenvolvimento, a escolha do pimentão justifica-se por sua alta sensibilidade ao manejo ambiental. Por possuir um sistema radicular relativamente superficial, a planta exige uma manutenção rigorosa da umidade do solo; tanto o déficit hídrico quanto o encharcamento podem causar perdas imediatas na produtividade e o surgimento de doenças fisiológicas.

Dessa forma, o pimentão atua como um excelente modelo biológico para validar o sistema de monitoramento proposto, uma vez que o controle preciso das variáveis de umidade e temperatura do solo através de sensores é determinante para suprir suas exigências fisiológicas e garantir a qualidade final do fruto [Souza and Matsura, 2021; Lopes and Silva, 2022].

2.4 Agricultura 4.0 e Tecnologias Habilitadoras

A gestão manual de sistemas agrícolas, mesmo em ambientes controlados, permanece suscetível a ineficiências. A superação desses desafios reside na Agricultura 4.0, que integra tecnologias digitais — como *IoT*, Conectividade, *Cloud Computing*, *Big Data* e Automação — para criar ecossistemas inteligentes e transitar da Agricultura de Precisão para uma Agricultura Preditiva e Digital [Lisbinski *et al*., 2020].

A materialização desses conceitos através da automação de sistemas de irrigação proporciona benefícios que variam da economia de recursos hídricos e tempo à redução da intervenção humana. A automatização eleva a eficiência na aplicação de água e nutrientes, mitigando desperdícios e otimizando a produtividade da cultura ao controlar com precisão os insumos e evitar a sub ou superirrigação [dos Santos *et al*., 2014].

2.4.1 Arquitetura de Comunicação: Rede LoRa

No âmbito da conectividade, destaca-se a tecnologia LoRa (*Long Range*), uma técnica de modulação sem fio projetada para alcançar grandes distâncias (até 30 km em condições ideais) com baixo consumo energético e alta capacidade de penetração de sinal. Essas características a tornam ideal para aplicações de IoT em ambientes rurais e urbanos, servindo de base para o protocolo de rede LoRaWAN [Alipio *et al*., 2024]. No Brasil, a tecnologia foi regulamentada pela ANATEL em 2017 (Ato 14.448), operando no padrão de 915 MHz a 928 MHz [Ortiz *et al*., 2019].

2.4.2 Rede CAN

Controller Area Network (CAN) é um padrão de barramento serial de dois fios, desenvolvido pela *Bosch* na década de 1980, originalmente para a indústria automotiva, visando a interconexão rápida e segura entre microcontroladores com taxas de transmissão de até 1 Mbps [Robert Bosch GmbH, 1991]. O protocolo estrutura-se em camadas (objeto, transferência e física), diferenciando-se do modelo OSI por focar, em sua camada física, na temporização e sincronização dos bits [Di Natale *et al*., 2012].

A robustez da rede CAN reside em seu sistema de mensagens (dados, erro, requisição e sobrecarga) e no método de arbitragem CSMA/DCR (*Carrier Sense Multiple Access/Deterministic Collision Resolution*). Este mecanismo prioriza o acesso ao barramento com base em identificadores de mensagem, evitando colisões e garantindo que módulos prioritários transmitam dados críticos sem atrasos, o que confere ao sistema baixo custo, alta precisão e confiabilidade operacional [de Souza and Campos, 2017].

2.4.3 Plataformas de Supervisão e Controle

As plataformas de supervisão e controle desempenham papel fundamental em sistemas de agricultura de precisão, pois integram dispositivos de campo, serviços de armazenamento, mecanismos de processamento e interfaces de visualização. Em sistemas agrícolas baseados em Internet das Coisas, essas plataformas permitem que dados provenientes de sensores sejam organizados, armazenados e apresentados ao usuário de forma compreensível, apoiando o acompanhamento das condições de cultivo e a tomada de decisão [García-García

et al., 2020; Kamienski *et al*., 2019].

No contexto da irrigação inteligente, plataformas *IoT* geralmente são organizadas em camadas, envolvendo dispositivos de sensoriamento, comunicação, infraestrutura em nuvem e interfaces de supervisão. Essa estrutura permite que variáveis como temperatura, umidade relativa do ar, umidade do solo e outros parâmetros ambientais sejam monitorados em tempo real, possibilitando a análise das condições de cultivo e o planejamento de intervenções de irrigação [Morchid *et al*., 2024].

Além da visualização instantânea das medições, plataformas supervisórias podem incorporar recursos como histórico de dados, geração de gráficos, configuração de limiares operacionais, notificações e suporte à automação. Esses recursos são relevantes para a transição de sistemas meramente informativos para sistemas de apoio à decisão ou controle automático, nos quais atuadores, como bombas e válvulas de irrigação, podem ser acionados com base em regras previamente definidas ou em algoritmos de controle [Maia *et al*., 2020; Morchid *et al*., 2024].

Outro aspecto importante refere-se aos requisitos de operação dessas plataformas em ambientes agrícolas. Sistemas aplicados ao campo devem ser escaláveis, flexíveis, capazes de lidar com diferentes tipos de sensores e robustos diante de falhas de comunicação ou de dispositivos. Tais requisitos são especialmente importantes em aplicações rurais, nas quais a conectividade pode ser instável e os dispositivos estão sujeitos a condições ambientais adversas [Maia *et al*., 2020].

Nesse sentido, a camada de supervisão constitui um elemento estratégico para a adoção de tecnologias digitais no campo, pois aproxima o usuário final dos dados produzidos pelos sensores e favorece a tomada de decisão baseada em evidências. Assim, sua presença em sistemas agrícolas inteligentes contribui para a rastreabilidade das informações, para o acompanhamento das condições de cultivo e para a melhoria da eficiência no uso de recursos hídricos.

3 Arquitetura e Implementação do Sistema

A arquitetura do sistema proposto foi desenvolvida para operar como uma plataforma modular de monitoramento agrícola, integrando sensoriamento distribuído, comunicação local, transmissão sem fio, armazenamento em nuvem e visualização web. Conforme ilustrado na Figura 1, a solução é organizada em três subsistemas: o Subsistema 1, responsável pela rede local de sensoriamento baseada em CAN; o Subsistema 2, composto pelo *gateway* CAN/LoRa, pela estação base e pela aplicação de supervisão; e o Subsistema 3, associado à persistência e sincronização dos dados em nuvem.

O protótipo foi concebido para monitorar variáveis de solo e ambiente no cultivo de pimentão em laboratório, nas dependências da UNIVASF, Campus Juazeiro/BA. Embora a arquitetura tenha sido planejada para permitir a futura integração de válvulas solenoides e sensores de fluxo, a implementação validada neste trabalho concentrou-se na aquisição, transmissão, armazenamento e visualização dos dados.

3.1 Subsistema 1: rede de sensoriamento CAN

O Subsistema 1 corresponde à rede local de aquisição de dados. Sua arquitetura foi baseada em uma topologia de barramento CAN, na qual os nós sensores são conectados a um mesmo meio físico e transmitem dados provenientes dos sensores a uma taxa de 250 kbps. Cada nó foi implementado em uma placa de circuito impresso dedicada, contendo unidade de processamento, interface de comunicação e circuitos de condicionamento para os sensores.

As placas foram alimentadas por uma fonte de 12 V/3,5 A, com regulação local para 5 V, tensão utilizada pelo microcontrolador e pelos componentes eletrônicos. A unidade de processamento de cada nó foi baseada no microcontrolador PIC18F2580 [Inc., 2024], o qual possui um controlador CAN integrado. A interface com o barramento físico foi realizada por meio do transceptor MCP2551 [Inc., 2018].

Na configuração implementada, foram previstos quatro nós na rede. Os nós 2 e 3 foram instrumentados para monitoramento do solo, enquanto o nó 4 foi dedicado ao monitoramento das condições ambientais. O nó 1 foi mantido como ponto de expansão da rede, demonstrando a possibilidade de incorporar novos pontos de medição sem alterar a estrutura principal do sistema.

3.1.1 Nós de monitoramento do solo

Os nós de monitoramento do solo foram projetados para aferir variáveis edáficas relevantes ao manejo hídrico do pimentão. Cada nó de solo é composto por um microcontrolador PIC18F2580, um sensor DS18B20 [Integrated, 2015] para medição da temperatura do solo e um sensor de umidade do solo Watermark 200SS [IRROMETER Company, Inc., 2026] para medição da umidade do solo. O DS18B20 fornece leituras digitais de temperatura na região próxima à zona radicular, enquanto o sensor *Watermark 200SS* é um sensor matricial granular utilizado para estimar a tensão da água no solo. Seu princípio de funcionamento baseia-se na variação da resistência elétrica em uma matriz granular, cuja resposta está relacionada ao potencial hídrico do solo.

3.1.2 Nó de monitoramento do ambiente

O nó 4 foi implementado para fornecer informações macroclimáticas do ambiente de cultivo. Para isso, foi utilizado o sensor DHT22, responsável pela medição da temperatura ambiente e da umidade relativa do ar [ASAIR, 2021]. Essas informações complementam as leituras de solo e permitem relacionar as condições edáficas às condições gerais do ambiente.

O posicionamento do nó ambiental foi planejado para reduzir distorções causadas pela proximidade com o solo, com as plantas ou com fontes localizadas de aquecimento. Dessa forma, as medições desse nó podem servir como referência para análises futuras envolvendo evapotranspiração, conforto climático e resposta da cultura às condições ambientais.

3.1.3 Protótipo físico

A Figura 2 apresenta o protótipo físico do sistema de sensoriamento. A implementação foi dimensionada para operar com alimentação de 12 V DC, característica que favorece sua futura integração com baterias ou sistemas de energia solar

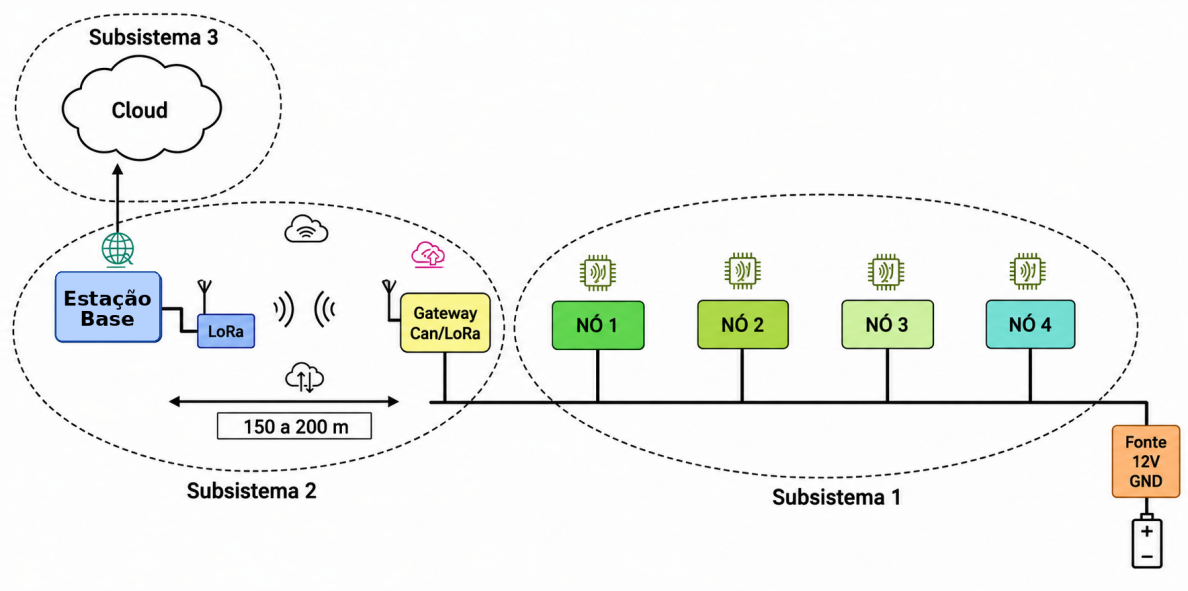


Figura 1. Arquitetura do sistema proposto.

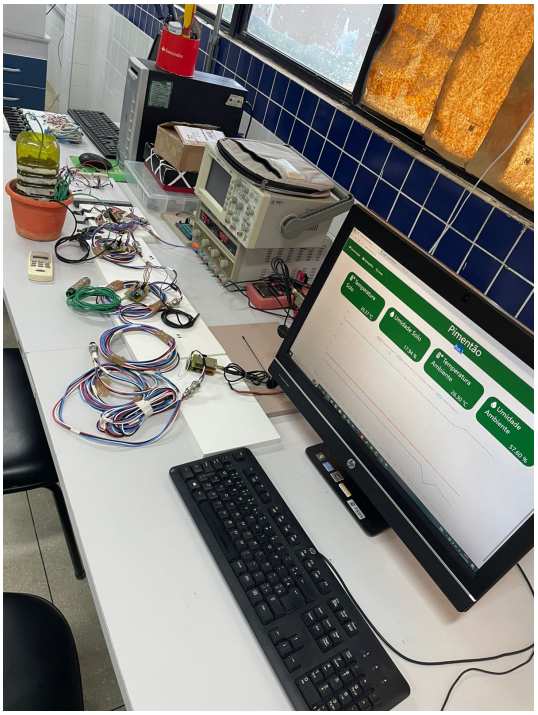


Figura 2. Protótipo físico do sistema de sensoriamento.

em aplicações de campo.

A concepção original dos nós considerou a possibilidade de evolução para um sistema de controle em malha fechada. Para a cultura do pimentão, foram adotados como referência valores de temperatura do solo entre 20°C e 30°C e umidade do solo entre 60% e 80%. A lógica prevista permitiria acionar uma válvula solenoide em situações nas quais as leituras ultrapassassem limites configurados. No entanto, a integração física da válvula e do sensor de fluxo não foi incluída nesta versão do protótipo, permanecendo como trabalho futuro.

Os *firmwares* dos nós foram desenvolvidos em linguagem C, utilizando a *IDE PIC C Compiler*, e gravados nos microcontroladores com o programador PICKit 2 [Inc., 2005]. Cada nó recebeu uma lógica específica de leitura e transmissão, de acordo com sua função na rede.

3.2 Subsistema 2: *gateway* CAN/LoRa e estação base

O Subsistema 2 realiza a integração entre a rede local de sensoriamento e a plataforma de supervisão. Ele é composto por um gateway CAN/LoRa, responsável por receber mensagens do barramento CAN e retransmiti-las via LoRa para uma estação base, responsável por receber os dados sem fio, processá-los e encaminhá-los à nuvem.

A comunicação foi organizada em três etapas. Na primeira, os nós sensores enviam suas leituras ao barramento CAN utilizando identificadores de mensagem associados a cada variável monitorada. Na segunda, o *gateway* CAN/LoRa escuta as mensagens do barramento, empacota os dados relevantes e os transmite por rádio frequência. Na terceira, a estação base recebe os pacotes LoRa por meio de um módulo conectado via USB ao computador.

3.2.1 Estação base e integração IT/OT

O *Gateway PC* representa o ponto de integração entre a tecnologia da operação (OT), composta pelos sensores, rede CAN e enlace LoRa, e a tecnologia da informação (IT), composta pelo *backend*, banco de dados em nuvem e interface web. Um módulo receptor LoRa conectado ao computador entrega os dados recebidos à porta serial, onde são tratados pela aplicação *backend*.

No computador da estação base, a aplicação desenvolvida em Node.js realiza a leitura da porta serial, valida e transforma os dados recebidos, agrupa as leituras e as envia ao *Firebase*. O mesmo ambiente computacional pode hospedar a aplicação web em Vue.js, utilizada como Interface Homem-Máquina (IHM) para visualização dos dados.

3.3 Subsistema 3: plataforma em nuvem

O Subsistema 3 foi implementado com o *Firebase Realtime Database*, responsável pela persistência e sincronização das leituras. O banco de dados foi organizado em estrutura NoSQL, no formato de árvore JSON, permitindo associar cada leitura ao respectivo nó, variável monitorada e instante de aquisição.

A organização adotada seguiu uma estrutura do tipo `UsersData/NodeID/readings/timestamp`. Essa forma de armazenamento favorece a rastreabilidade das medições e permite que a aplicação web recupere tanto valores atuais quanto registros históricos. Além disso, a natureza reativa do *Firebase* permite que alterações no banco sejam refletidas automaticamente na interface, reduzindo a necessidade de implementação manual de mecanismos de atualização por *polling* ou *WebSockets*.

3.4 *Backend* e fluxo de dados

O *backend* foi desenvolvido como um serviço em Node.js responsável pela ingestão, validação, transformação e persistência dos dados recebidos pela estação base. A comunicação com o módulo LoRa conectado ao computador foi realizada por meio da biblioteca `serialport`, com segmentação do fluxo por quebras de linha para permitir o processamento individual das mensagens.

Para reduzir a possibilidade de armazenamento de dados incorretos, foi implementado um filtro de validação baseado em expressão regular. Apenas mensagens compatíveis com o protocolo definido para identificação do nó e das grandezas medidas são aceitas pelo sistema. Após a validação, o *backend* aplica conversões específicas conforme o identificador do nó e a variável recebida, normalizando os valores antes do envio ao banco de dados.

Também foi implementada uma lógica de envio por rodadas, com armazenamento temporário da leitura mais recente de cada nó em um buffer. Quando uma rodada válida é completada, os dados são enviados em lote ao *Firebase*, e o sistema aguarda um intervalo antes de novo envio. Essa estratégia reduz escritas excessivas no banco de dados e mantém uma atualização periódica adequada ao comportamento das variáveis agrícolas monitoradas.

3.5 Aplicação web de supervisão

A aplicação web foi desenvolvida com o *framework Vue.js* e constitui a camada de visualização e interação do sistema. Sua função é permitir que o usuário acompanhe as variáveis monitoradas, visualize históricos de medições e acesse páginas de configuração preparadas para futuras funcionalidades de controle. A aplicação foi organizada como uma *Single Page Application* (SPA), proporcionando navegação fluida e atualização dinâmica dos dados sincronizados no *Firebase*.

3.5.1 Autenticação e página inicial

O acesso ao sistema ocorre por meio de uma tela de autenticação, ilustrada na Figura 3. A implementação utilizou o *Firebase Authentication* para gerenciamento de credenciais e controle de acesso, restringindo a visualização dos dados a usuários autorizados.

Após a autenticação, o usuário é direcionado à página inicial, mostrada na Figura 4. Essa página funciona como painel de navegação principal, permitindo acesso às ruas de monitoramento e às páginas de configuração.

3.5.2 Dashboard de monitoramento

Os *dashboards* de monitoramento constituem o principal recurso funcional da aplicação. Eles são acessados a partir da página inicial e representam diferentes ruas de plantio. Cada *dashboard* apresenta cartões informativos com as leituras atuais e gráficos históricos das variáveis monitoradas, como mostrado na Figura 5.

A atualização dos cartões e gráficos é realizada por meio do método `onValue` do *Firebase Realtime Database*. Esse método estabelece uma conexão reativa com os nós de dados, permitindo que a interface seja atualizada automaticamente sempre que novas leituras são inseridas no banco.

3.5.3 Página de configuração

A página de configuração foi projetada como infraestrutura inicial para a transição do sistema de monitoramento para um sistema com controle ativo. Nessa interface, são previstos campos para definição de limiares operacionais relacionados às variáveis monitoradas, como umidade e temperatura do solo e do ambiente.

Embora o protótipo validado opere em modo de monitoramento, a leitura e a escrita de configurações no *Firebase* validam o caminho para futuras implementações nas quais alterações realizadas pelo usuário possam ser interpretadas pelo *backend* e repassadas ao *hardware* de campo, permitindo o acionamento de atuadores.

3.6 Procedimento de validação experimental

A validação experimental do protótipo foi conduzida em ambiente de laboratório, com o objetivo de verificar a integração entre os nós sensores, a rede CAN, o enlace LoRa, a estação base e a plataforma *web* em nuvem. Os ensaios foram realizados utilizando recipientes com solo e mudas de pimentão, de modo a reproduzir, em escala reduzida, uma condição de cultivo monitorado.

O procedimento de teste foi organizado em quatro etapas. Na primeira etapa, verificou-se individualmente a leitura dos sensores de temperatura do solo, umidade do solo, temperatura ambiente e umidade relativa do ar. Na segunda etapa, avaliou-se a comunicação local entre os nós sensores e o *gateway* por meio da rede CAN, configurada para operar a 250 kbps. Na terceira etapa, os dados recebidos pelo *gateway* CAN/LoRa foram retransmitidos por comunicação LoRa até a estação base, sendo o enlace validado em uma distância aproximada entre 150 m e 200 m. Na quarta etapa, os dados recebidos pela porta serial do computador foram processados pela aplicação Node.js, armazenados no *Firebase Realtime Database* e exibidos no *dashboard web* desenvolvido em *Vue.js*.

Para avaliar o desempenho do sistema, foram considerados os seguintes indicadores: taxa nominal de transmissão da rede CAN, taxa efetiva estimada do enlace LoRa, tamanho médio do pacote transmitido, alcance experimental do enlace sem fio, intervalo de atualização das leituras e tempo de resposta ponta a ponta. O tempo de resposta foi definido como o intervalo aproximado entre a aquisição da leitura pelo nó sensor e a atualização visual correspondente na interface *web*.

4 Resultados e Discussões

Esta seção apresenta os resultados obtidos a partir da validação experimental do sistema proposto, considerando a operação integrada dos nós sensores, da rede CAN, do enlace LoRa, da estação base, do banco de dados em nuvem e da interface *web* de supervisão. Diferentemente da seção anterior, que

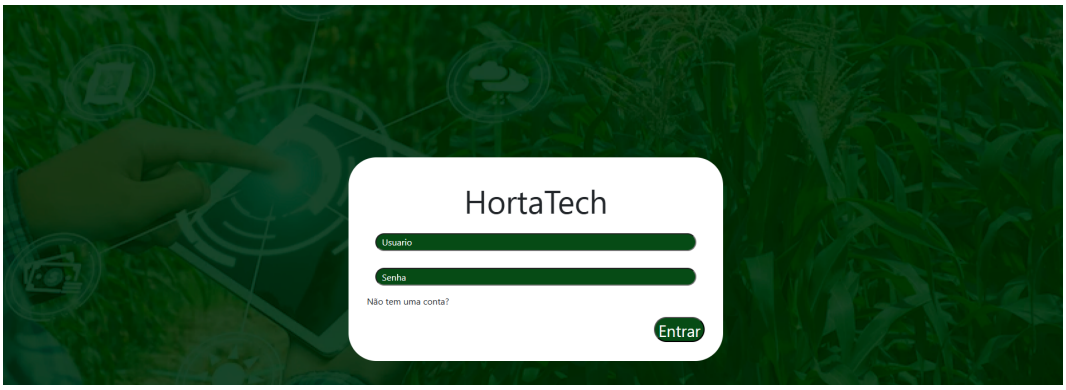


Figura 3. Interface de login do sistema.



Figura 4. Página inicial da aplicação *web*.

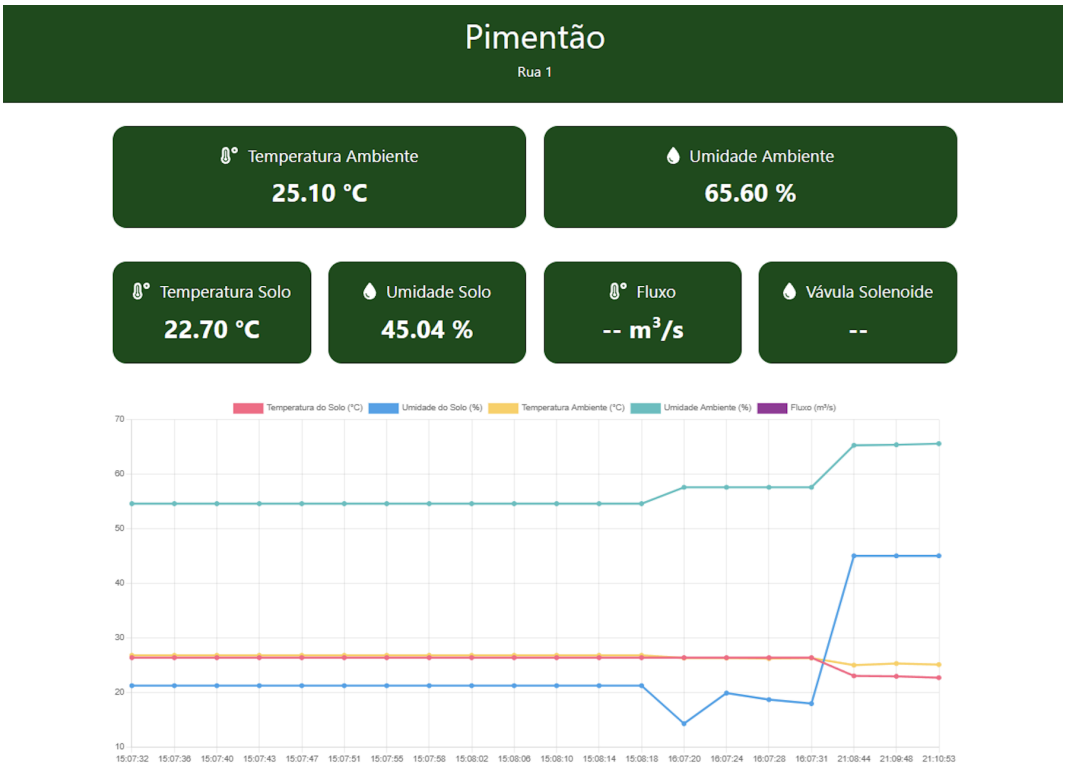


Figura 5. *Dashboard* de monitoramento das variáveis do sistema.

descreveu a arquitetura e a implementação dos subsistemas, a análise apresentada a seguir concentra-se nos aspectos mensuráveis do protótipo, na funcionalidade observada durante os testes e nas limitações identificadas.

4.1 Validação funcional do protótipo

A validação funcional demonstrou que o sistema foi capaz de realizar o fluxo completo de aquisição, transmissão, processamento, armazenamento e visualização dos dados. As leituras de temperatura do solo, umidade do solo, temperatura ambiente e umidade relativa do ar foram coletadas pelos nós sensores, transmitidas pela rede CAN até o *gateway*, retransmitidas por LoRa até a estação base, processadas pelo *backend* e disponibilizadas na interface *web*.

Durante os testes, observou-se que os dados recebidos foram organizados por nó e por variável monitorada, permitindo sua exibição em cartões informativos e em gráficos históricos no *dashboard*. Esse resultado confirma a integração entre as camadas de *hardware*, comunicação e *software*, demonstrando que a arquitetura proposta é funcional para aplicações

de monitoramento agrícola em escala de protótipo.

4.2 Desempenho da comunicação CAN–LoRa

Os testes realizados permitiram quantificar parâmetros importantes de desempenho da comunicação e da atualização dos dados. A Tabela 1 apresenta os principais indicadores observados durante a validação experimental.

Tabela 1. Indicadores quantitativos observados na validação do sistema.

Indicador	Valor observado/-configurado	Interpretação
Taxa da rede CAN	250 kbps	Valor suficiente para o volume de dados dos sensores e adequado para expansão da rede local.
Taxa efetiva LoRa	$\approx$ 5,4 kbps	Compatível com o *payload* reduzido do sistema e com aplicações de telemetria agrícola.
Payload médio	$\approx$ 32 *bytes*	Pacote compacto, adequado para transmissão periódica de leituras ambientais.
Alcance LoRa validado	150 m a 200 m	Comunicação sem fio adequada para separar a área monitorada da estação base.
Tempo de resposta ponta a ponta	1,5 s a 2,0 s	Intervalo entre aquisição, transmissão, processamento, armazenamento e atualização do *dashboard*.
Intervalo de envio das leituras	configurável; testes com atualização periódica	Permite ajustar a frequência de coleta conforme a necessidade agronômica e o custo de armazenamento.
Número de nós implementados	quatro nós previstos, com nós ativos de solo e ambiente	Arquitetura modular, preparada para expansão horizontal.

A comunicação CAN apresentou desempenho estável durante os testes, sem perdas perceptíveis de dados na integração entre os nós sensores e o *gateway*. A adoção desse protocolo mostrou-se adequada para a rede local de campo, pois sua sinalização diferencial, seus mecanismos de arbitragem e sua verificação de erros favorecem a operação em ambientes sujeitos a interferências eletromagnéticas.

O enlace LoRa, por sua vez, demonstrou ser apropriado para a comunicação entre o *gateway* e a estação base. Embora a taxa de transmissão efetiva seja inferior à da rede CAN, o tamanho reduzido dos pacotes transmitidos torna essa limitação pouco relevante para a aplicação proposta. Como os dados de temperatura e umidade variam lentamente no contexto do monitoramento agrícola, a prioridade do enlace não é a alta vazão, mas sim o alcance, a robustez e o baixo consumo energético.

4.3 Desempenho da plataforma *web*

A integração com o *Firebase Realtime Database* permitiu que as leituras fossem sincronizadas com a aplicação *web* de forma reativa. Essa estratégia eliminou a necessidade de consultas periódicas tradicionais ao servidor e permitiu que o *dashboard* fosse atualizado automaticamente sempre que novos dados fossem inseridos no banco.

Nos testes realizados, o tempo médio de resposta de 1,5 s a 2,0 s mostrou-se adequado para uma aplicação de monitoramento agrícola, especialmente porque as variáveis analisadas não exigem tempos de atuação na ordem de milissegundos. Do ponto de vista funcional, o sistema permitiu a visualização das leituras atuais em cartões informativos e o acompanhamento histórico das variáveis por meio de gráficos.

Essa organização facilitou a identificação de tendências, como variações de umidade do solo, oscilações de temperatura e mudanças na umidade relativa do ar. Assim, a interface desenvolvida atua como ferramenta de apoio à decisão, permitindo que o operador acompanhe as condições do cultivo e planeje intervenções de irrigação com maior base quantitativa.

4.4 Análise crítica dos resultados

Os resultados obtidos indicam que a principal contribuição do trabalho está na integração funcional de uma arquitetura híbrida de comunicação, combinando rede CAN para a camada local de sensoriamento e LoRa para o enlace de longa distância. Essa combinação apresenta mérito técnico para aplicações agrícolas, pois separa a rede de campo, que exige robustez e organização determinística das mensagens, da rede sem fio, que exige maior alcance e menor dependência de infraestrutura de internet no local de cultivo.

A adoção da rede CAN mostrou-se especialmente adequada para a conexão entre os nós sensores, pois permite a expansão do sistema por meio da inclusão de novos nós no barramento. Além disso, o uso de identificadores de mensagem facilita a diferenciação entre leituras de diferentes sensores e diferentes ruas de plantio. Essa característica é importante para aplicações futuras em áreas maiores, nas quais múltiplos pontos de medição podem ser distribuídos ao longo da estufa ou do campo.

A comunicação LoRa complementou a arquitetura ao permitir que os dados da rede local fossem enviados a uma estação base localizada a uma distância de até 200 m durante os testes. Esse resultado é relevante para o contexto rural, no qual frequentemente há limitação de infraestrutura de rede cabeada ou Wi-Fi. A taxa efetiva estimada de 5,4 kbps foi suficiente para o envio dos pacotes de telemetria, uma vez que as leituras de temperatura e umidade possuem baixo volume de dados e não exigem transmissão contínua em alta frequência.

A interface *web* desenvolvida também se mostrou adequada ao objetivo do sistema. A organização dos dados em cartões e gráficos permite que o usuário interprete rapida-

mente o estado do cultivo. Além disso, a arquitetura baseada em *Firebase* e *Vue.js* favoreceu a atualização em tempo real da interface, com latência média compatível com a dinâmica das variáveis monitoradas.

Apesar desses resultados, é importante destacar que a validação realizada ainda se concentrou na funcionalidade do sistema de monitoramento e na comunicação ponta a ponta. A etapa de controle físico da irrigação, incluindo o acionamento da válvula solenoide e a medição do volume de água por sensor de fluxo, não foi implementada no protótipo validado. Dessa forma, ainda não foi possível quantificar experimentalmente a economia de água em comparação ao manejo manual. Essa limitação não compromete a validade da arquitetura proposta, mas delimita o alcance dos resultados apresentados neste estudo.

4.5 Limitações do estudo

Embora o sistema tenha demonstrado viabilidade técnica, algumas limitações devem ser consideradas. A primeira está relacionada ao ambiente de validação. Os testes foram realizados em bancada e em ambiente laboratorial, utilizando recipientes com solo e cultivo de pimentão em escala reduzida. Portanto, os resultados ainda não representam integralmente as condições de uma estufa agrícola em operação contínua, sujeita a variações climáticas mais intensas, interferências eletromagnéticas, umidade elevada, poeira e maior distância entre os nós.

A segunda limitação refere-se à ausência de validação agronômica de longo prazo. O sistema monitorou variáveis relevantes para o manejo hídrico, mas não foi realizado um ciclo completo de cultivo comparando produtividade, consumo de água ou consumo de energia entre o manejo manual e o manejo apoiado pelo sistema. Assim, embora a arquitetura seja compatível com estratégias de economia hídrica, os ganhos em termos de redução de consumo de água ainda precisam ser medidos experimentalmente.

A terceira limitação está associada ao subsistema de atuação. A interface *web* e a estrutura lógica foram projetadas para futura integração de válvulas solenoides e sensores de fluxo, porém o acionamento físico da irrigação não foi validado nesta etapa. Consequentemente, o sistema atual deve ser caracterizado como uma plataforma de monitoramento com suporte à decisão, e não como um sistema de irrigação totalmente automatizado.

Por fim, a calibração dos sensores deve ser aprofundada em trabalhos futuros. Embora os sensores utilizados sejam adequados para prototipagem e validação funcional, uma avaliação mais robusta deve incluir comparação com instrumentos de referência, análise de erro, repetibilidade das medições e estabilidade das leituras ao longo do tempo.

5 Considerações finais

Este trabalho apresentou o desenvolvimento e a validação experimental de um sistema de monitoramento para apoio ao manejo hídrico no cultivo de pimentão, integrando sensores, microcontroladores, rede CAN, comunicação LoRa, *backend* em Node.js, banco de dados em nuvem *Firebase* e interface *web* em *Vue.js*. A arquitetura proposta foi concebida de forma modular, permitindo a expansão do número de nós sensores e a futura inclusão de atuadores para automação da irrigação.

Os testes realizados demonstraram a operação integrada do sistema, desde a aquisição das leituras pelos nós sensores até a visualização em tempo real no *dashboard web*. A rede CAN foi configurada em 250 kbps e mostrou-se adequada para a comunicação local entre os nós. O enlace LoRa foi validado em uma distância aproximada entre 150 m e 200 m, com *payload* médio de 32 *bytes* e taxa efetiva estimada em 5,4 kbps. A atualização da interface apresentou tempo médio de resposta entre 1,5 s e 2,0 s, valor considerado satisfatório para o monitoramento de variáveis agrícolas de variação lenta, como temperatura e umidade do solo e do ambiente.

A principal contribuição do trabalho está na demonstração de uma arquitetura híbrida CAN–LoRa aplicada ao monitoramento agrícola, combinando robustez na comunicação local, alcance sem fio para transmissão dos dados e visualização remota em ambiente *web*. Essa integração torna o sistema uma base promissora para aplicações de agricultura de precisão em pequenas propriedades, estufas e ambientes de cultivo protegido.

Como limitação, destaca-se que a validação foi realizada em ambiente de laboratório e que o acionamento físico da irrigação ainda não foi implementado. Dessa forma, não foi possível quantificar, nesta etapa, a economia efetiva de água ou energia em comparação ao manejo manual. Trabalhos futuros devem incluir a implementação da válvula solenoide e do sensor de fluxo, a calibração sistemática dos sensores, a realização de testes em estufa durante um ciclo completo de cultivo e a comparação quantitativa do consumo de água antes e depois da automação.

Mesmo com essas limitações, os resultados obtidos indicam que a arquitetura proposta é tecnicamente viável, escalável e adequada para evoluir de uma plataforma de monitoramento para um sistema automatizado de irrigação baseado em dados.

Declarações complementares

Contribuições dos autores

Ambos os autores contribuíram para a concepção, metodologia e validação deste estudo, desenvolvimento e arquitetura de hardware. PHFAS desenvolveu o software da plataforma e realizou os experimentos. JSS atuou na supervisão e orientação geral do projeto. Ambos os autores realizaram conjuntamente a análise formal dos dados obtidos e a redação da conclusão. PHFAS é o principal contribuidor e escritor deste manuscrito.Todos os autores leram e aprovaram o manuscrito final.

Conflitos de interesse

Os autores declaram que não há conflitos de interesse.

Disponibilidade de artefatos de pequisa

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

Uso de Inteligência Artificial

Os autores utilizaram o ChatGPT para revisão textual.

Outras informações relevantes

O manuscrito não precisou de aceite em comitê de ética, visto que não foram utilizados animais e nem pessoas durante a pesquisa.

Referências

Alipio, M. *et al*. (2024). A review of lorawan performance optimization through cross-layer approaches. *Internet of Things*.

ASAIR (2021). Data sheet DHT20. `https://aqicn.org/air/sensor/spec/asair-dht20.pdf`. Acessado em: 16-06-2024.

CEPEA/ESALQ-USP (2024). Pib do agronegócio fecha 2023 com queda de 2,99%. Technical report, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada, Piracicaba.

de Souza, A. G.; Campos, G. L. (2017). Rede can veicular: levantamento bibliográfico e apresentação de conceitos iniciais. *ForScience*, 5(1).

Di Natale, M., Zeng, H., Giusto, P., and Ghosal, A. (2012). *Understanding and using the controller area network communication protocol: theory and practice*. Springer Science & Business Media.

dos Santos, C. M., COSTA, B., SILVA, R., and Scalassara, P. R. (2014). Desenvolvimento de um módulo de controle de nível utilizando o kit arduino uno. In *XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte, Brasil*.

Duraes, W., Ferreira, F. H. I. B., and Manzan, R. (2022). *Arquitetura de soluções IoT: Desenvolva com Internet das Coisas para o mundo real*. Casa do Código.

Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., and Hindia, M. N. (2018). An overview of internet of things (iot) and data analytics in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(5):3758–3773. DOI: 10.1109/JIOT.2018.2844392.

Embrapa (2019). A agricultura brasileira - portal embrapa. `https://www.embrapa.br/vii-plano-diretor/a-agricultura-brasileira`. Acessado em: 30-04-2024.

Furrier, M. and Ross, J. L. S. (2004). Aplicação da técnica de plantio direto em plantação de café localizada em ambiente de alta fragilidade.

García-García, L., Parra, L., Jimenez, J. M., Lloret, J., and Lorenz, P. (2020). Iot-based smart irrigation systems: An overview on the recent trends on sensors and iot systems for irrigation in precision agriculture. *Sensors*, 20(4):1042. DOI: 10.3390/s20041042.

Inc., M. T. (2005). Pickit 2 programmer/debugger user's guide. Acesso em: 15 jun. 2024.

Inc., M. T. (2018). *MCP2551 CAN Transceiver Data Sheet*. Microchip Technology Inc., Chandler. Acesso em: 15 jun. 2024.

Inc., M. T. (2024). *PIC18F2580 Data Sheet*. Microchip Technology Inc., Chandler. Acesso em: 15 jun. 2024.

Integrated, M. (2015). Ds18b20 programmable resolution 1-wire digital thermometer, waterproof version. Acesso em: 15 jun. 2024.

IRROMETER Company, Inc. (2026). *WATERMARK 200SS Soil Moisture Sensor*. IRROMETER Company, Inc. Acesso em: 03 jun. 2026.

Kamienski, C., Soininen, J.-P., Taumberger, M., Dantas, R., Toscano, A., Cinotti, T. S., Maia, R. F., and Torre Neto, A. (2019). Smart water management platform: Iot-based precision irrigation for agriculture. *Sensors*, 19(2):276. DOI: 10.3390/s19020276.

Lisbinski, F. C., Mühl, D. D., Oliveira, L. d., and Coronel, D. A. (2020). Perspectivas e desafios da agricultura 4.0 para o setor agrícola. *Anais..[do] VIII Simpósio da Ciência do Agronegócio*.

Lopes, M. T. and Silva, R. S. (2022). Desenvolvimento e produtividade da cultura do pimentão sob diferentes regimes de irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 26(4):245–252.

Maia, R. F., Ballester Lurbe, C., Agrahari Baniya, A., and Hornbuckle, J. (2020). Irrisens: An iot platform based on microservices applied in commercial-scale crops working in a multi-cloud environment. *Sensors*, 20(24):7163. DOI: 10.3390/s20247163.

Marouelli, W. A., Oliveira, S. d., Coelho, E. F., Sousa, L. C. N., and de, V. F. (2011). `https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/55931/1/IRRIGACAO-e-FERTIRRIGACAO-cap5.pdf`. Acessado em: 30-04-2024.

Matias, S. R. S. (2021). Cobertura do solo no cultivo da cebolinha-comum: eficiência no controle de plantas daninhas e uso da água.

Morchid, A., Jebabra, R., Khalid, H. M., El Alami, R., Qjidaa, H., and Ouazzani Jamil, M. (2024). Iot-based smart irrigation management system to enhance agricultural water security using embedded systems, telemetry data, and cloud computing. *Results in Engineering*, 23:102829. DOI: 10.1016/j.rineng.2024.102829.

Ortiz, F. M., Almeida, T., Ferreira, A. E. L. A., and Costa, L. H. M. K. (2019). Caracterizaçao de desempenho de uma rede lora em ambientes urbanos: Simulaçao vs. prática. In *Anais do III Workshop de Computação Urbana*, pages 167–180. SBC.

Pereira, S. A. *et al*. (2023). Impactos da agricultura 4.0 nos pequenos produtores rurais de uma cooperativa do agronegócio no paraná. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Robert Bosch GmbH (1991). CAN Specification Version 2.0. Technical report, Robert Bosch GmbH, Stuttgart, Germany.

Souza, A. C. and Matsura, J. M. (2021). Manejo hídrico e automação na cultura do pimentão em ambiente protegido. *Horticultura Brasileira*, 39:112–119.

Souza, C. A. (2017). Cultivo orgânico de cebolinha (allium fistulosum l.) sob diferentes manejos de cobertura de solo. *Anais dos Seminários de Iniciação Científica*, (21).

Souza, C. F. and Matsura, E. E. (2004). Distribuição da água no solo para o dimensionamento da irrigação por gotejamento. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8:7–15.