



DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO IOT PARA MONITORAMENTO DA UMIDADE DO SOLO NA CAFEICULTURA

Development of an IoT prototype for soil moisture monitoring in coffee farming

Desarrollo de un prototipo IoT para el monitoreo de la humedad del suelo en la caficultura

Isadora Bernardo Rezende¹ & Flávio Fraga Vilela^{2*}

^{1,2} Universidade Federal de Lavras Câmpus São Sebastião do Paraíso, Instituto de Inovação, Ciência e Tecnologia

¹ isadora.rezende1@estudante.ufla.br ^{2*} flaviofvillela@ufla.br

ARTIGO INFO.

Recebido: 08.12.2025

Aprovado: 02.03.2026

Disponibilizado: 20.03.2026

PALAVRAS-CHAVE: Agricultura de precisão; internet das coisas; monitoramento em tempo real; umidade do solo.

KEYWORDS: Precision agriculture; internet of things (IoT); real-time monitoring; soil moisture.

PALABRAS CLAVE: Agricultura de precisión; internet de las cosas (IoT); monitoreo en tiempo real, humedad del suelo.

***Autor Correspondente:** Vilela, F. F.

RESUMO

A tecnologia tem ampliado a eficiência na agricultura, contudo, no Brasil ainda persiste uma significativa disparidade entre propriedades altamente tecnificadas e aquelas com baixa adoção de soluções tecnológicas. Nesse contexto, o presente estudo apresenta o desenvolvimento de um protótipo baseado em Internet das Coisas para o monitoramento da umidade do solo em lavouras cafeeiras, com o objetivo de fornecer uma solução acessível e viável para apoiar o manejo da irrigação na agricultura de precisão. O protótipo utiliza um sensor resistivo de umidade do solo, um microcontrolador, um display e uma plataforma IoT para medir, visualizar e transmitir dados de umidade do solo em tempo real. O desenvolvimento do sistema seguiu as cinco fases do processo de desenvolvimento de produtos: conceito, planejamento, engenharia, testes e prototipagem. Os testes iniciais foram realizados em ambiente controlado, no qual o sistema apresentou leituras consistentes e respostas imediatas às variações de umidade do solo. Logo, conclui-se que o protótipo IoT apresenta potencial como solução de baixo custo para apoiar o monitoramento em tempo real da umidade do solo em lavouras de café. Para estudos futuros, recomenda-se a utilização de energia solar, a integração com redes de comunicação de longo alcance, aprimoramentos no processo de calibração e a aplicação de técnicas de inteligência artificial.

ABSTRACT

Technology has expanded efficiency in agriculture, however, in Brazil there is still a significant disparity between highly technified farms and those with low adoption of technological solutions. In this context, the present study presents the development of an Internet of Things (IoT)-based prototype for monitoring soil moisture in coffee plantations, with the objective of providing an accessible and viable solution to support irrigation management in precision agriculture. The prototype uses a resistive soil moisture sensor, a microcontroller, a display, and an IoT platform to measure, visualize, and transmit soil moisture data in real time. The system development followed the five phases of the product development process: concept, planning, engineering, testing, and prototyping. Initial tests were conducted in a controlled environment, in which the system showed consistent readings and immediate responses to variations in soil moisture. It is concluded that the IoT prototype presents potential as a low-cost solution to support real-time monitoring of soil moisture in coffee crops. For future studies, the use of solar energy, integration with long-range communication networks, improvements in the calibration process, and the application of artificial intelligence techniques are recommended.

RESUMEN

La tecnología ha ampliado la eficiencia en la agricultura; sin embargo, en Brasil aún persiste una significativa disparidad entre propiedades altamente tecnificadas y aquellas con baja adopción de soluciones tecnológicas. En este contexto, el presente estudio presenta el desarrollo de un prototipo basado en Internet de las Cosas (IoT) para el monitoreo de la humedad del suelo en cultivos de café, con el objetivo de proporcionar una solución accesible y viable para apoyar el manejo del riego en la agricultura de precisión. El prototipo utiliza un sensor resistivo de humedad del suelo, un microcontrolador, un display y una plataforma IoT para medir, visualizar y transmitir datos de humedad del suelo en tiempo real. El desarrollo del sistema siguió las cinco fases del proceso de desarrollo de productos: concepto, planificación, ingeniería, pruebas y prototipado. Las pruebas iniciales se realizaron en un ambiente controlado, en el cual el sistema presentó lecturas consistentes y respuestas inmediatas a las variaciones de humedad del suelo. Se concluye que el prototipo IoT presenta potencial como una solución de bajo costo para apoyar el monitoreo en tiempo real de la humedad del suelo en cultivos de café. Para estudios futuros, se recomienda el uso de energía solar, la integración con redes de comunicación de largo alcance, mejoras en el proceso de calibración y la aplicación de técnicas de inteligencia artificial.

INTRODUÇÃO

Com quase 300 anos de história na produção de café, o Brasil ocupa a posição de maior produtor e exportador mundial, além de ser o segundo maior consumidor (CONAB, 2024). Nas últimas duas décadas, a cafeicultura brasileira experimentou uma significativa modernização, marcada principalmente pela elevação do nível tecnológico das lavouras. Sendo 449,3 mil hectares de café são irrigados, representando 25% da área cultivada. Minas Gerais (MG) é o segundo estado com maior área absoluta (29,9%), atrás do Espírito Santo (ES) (ANA, 2021). No entanto, o manejo da irrigação ainda é deficiente, pois não há um entendimento generalizado de que um bom manejo pode aumentar a produtividade, reduzir os custos de produção e mitigar impactos ambientais (Silva & Reis 2017).

O monitoramento da umidade do solo é fundamental por influenciar diretamente o ciclo hidrológico e o manejo eficiente da irrigação. Na agricultura, esse parâmetro afeta o crescimento das plantas e a produtividade, podendo gerar problemas tanto pelo excesso quanto pela falta de água. Solos muito úmidos prejudicam a estrutura física e favorecem condições anaeróbias, enquanto a baixa umidade limita a absorção de nutrientes, aumenta a erosão e compromete fases críticas das culturas (Padhee et al., 2017).

Apesar da disponibilidade de alguns métodos de manejo, a adesão por parte dos agricultores é baixa, resultando em irrigação baseadas na experiência prática, sem uma estratégia racional de uso e manejo da água (Costa, 2006). No Brasil, entretanto, ainda existe uma grande disparidade entre propriedades altamente tecnificadas e aquelas que operam com pouca ou nenhuma adoção de soluções digitais (Buainain et al., 2021). A incorporação de tecnologias acessíveis e conectividade ampliada surge como estratégia para reduzir essa lacuna, permitindo que produtores de diferentes escalas tenham acesso a ferramentas de monitoramento e apoio à tomada de decisão (Cirani et al., 2010).

Inserido nesse cenário de necessidades, a Agricultura 4.0 representa uma evolução significativa ao integrar sensores, sistemas embarcados, computação em nuvem e análise de dados, com o objetivo de otimizar processos produtivos e aumentar a eficiência operacional (Bambini et al., 2018). O desenvolvimento de sensores de umidade acessíveis, conectados à internet e capazes de operar em tempo real, representa uma contribuição significativa para produtores que ainda enfrentam barreiras na adoção tecnológica (Andrade et al., 2024).

Assim, este trabalho propõe a criação de um protótipo IoT de monitoramento de umidade de solo para aplicações em agricultura de precisão, integrando microcontroladores e plataformas de IoT com o objetivo de fornecer uma ferramenta acessível, escalável e adequada ao monitoramento da umidade do solo em sistemas cafeeiros, contribuindo para a melhoria do manejo hídrico e para a maior eficiência produtiva na cafeicultura.

REFERENCIAL TEÓRICO

Agricultura de Precisão

O setor agrícola brasileiro está em constante evolução. Mesmo produtores de regiões mais isoladas, que antes tinham pouco acesso a tecnologias de comunicação, agora utilizam internet e smartphones em suas atividades. Historicamente, a agricultura passou da produção de subsistência para o uso intensivo de máquinas, avançando depois para a agricultura de precisão (AP) e, mais recentemente, para a agricultura digital (Villafuerte et al., 2018). Baseada no manejo, considerando diferenças existentes dentro da área de cultivo, permite aplicação localizada de insumos, como fertilizantes e corretivos (Basso et al., 2019). Corroborando,

(Rampim et al., 2012) citam a utilização de informações topográficas, de presença de terraços e tipos de solo, para definir unidades de manejo mais eficientes.

Assim, o avanço da AP também estimula a indústria de máquinas a integrar eletrônica e informática aos equipamentos agrícolas, resultando em máquinas com sistemas embarcados que impulsionaram ainda mais o desenvolvimento da agricultura de precisão no Brasil a partir dos anos 2000 (Villafuerte et al., 2018). Entretanto, apesar de seu potencial, Khan et al. (2021) destacam que ainda há desafios significativos para sua consolidação, como o acesso limitado à internet em zonas rurais e o custo elevado de sensores e equipamentos. Entretanto, observa-se uma tendência de expansão gradual da AP, considerando a redução progressiva dos custos tecnológicos e o avanço das infraestruturas de conectividade.

Indústria 4.0 na Agricultura

A industrialização pode ser compreendida por meio de três grandes revoluções, cada uma inserida em um contexto histórico próprio, que marcaram a consolidação do trabalho fabril e favoreceram a urbanização, permitindo maior escala e diversificação de bens de consumo (Carvalho, 2019).

O conceito de Quarta Revolução Industrial começou a ser discutido ainda em 1988, associado inicialmente ao processo de transformar invenções em inovações, no contexto do crescimento da pesquisa científica industrial (Rostow, 1988). Segundo Weyer et al. (2015), a Indústria 4.0 caracteriza-se por ambientes produtivos altamente conectados e integrados, capazes de permitir flexibilidade e produção personalizada em larga escala.

Assim, a Indústria 4.0 configura um novo marco no desenvolvimento industrial, ao promover a integração de sistemas de informação com processos produtivos, o que possibilita operações mais inteligentes e eficientes (Behie et al., 2023). Após os estágios de mecanização, eletrificação e informatização, esta fase incorpora tecnologias como Internet das Coisas (IoT), redes de comunicação avançadas e sistemas ciberfísicos, transformando a forma de produzir, gerenciar e trabalhar (Ding et al., 2023; Sahi et al., 2020).

Nesse contexto, esses avanços tecnológicos não se restringem ao setor industrial, estendendo-se também ao campo, onde originam o conceito de Agricultura 4.0. Embora diferentes termos sejam utilizados na literatura, como Agricultura 4.0, agricultura inteligente e quarta revolução agrícola, todos se referem basicamente ao mesmo conceito (Klerkx et al., 2019). Assim, esses termos podem ser usados como sinônimos (Santos Valle & Kienzle, 2020; Silveira et al., 2023).

Dessa forma, a Agricultura 4.0 pode ser entendida como a adoção de tecnologias modernas de comunicação, informação e automação para gerenciar a produção e a distribuição de produtos agrícolas, com o objetivo de aumentar a produtividade, melhorar a qualidade, reduzir custos e evitar o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas (Minhet et al., 2025).

Sensoriamento e Umidade do Solo

A umidade do solo corresponde à quantidade de água presente nas camadas superficiais do solo, sendo um fator determinante para processos como evaporação e infiltração (Kerr et al., 2010). Sendo um parâmetro fundamental para entender ciclos biogeoquímicos, a produtividade agrícola, eventos extremos como secas e enchentes, além de auxiliar na previsão climática em diferentes escalas (Vereecken et al., 2014; Mccol et al., 2017; Rossato et al., 2017).

A evaporação da água armazenada no solo contribui diretamente para o ciclo hidrológico e energético (Seneviratne, 2010). A umidade influencia o balanço de energia a partir da interação entre a radiação solar incidente e a radiação emitida pela superfície terrestre. Ao alcançar o solo, a água da chuva pode infiltrar, escoar ou ser drenada, interferindo no balanço hídrico local (Costa, 2017; Valente, 2023).

Sendo que a ocorrência de secas e o baixo desempenho agrícola afetam diversas regiões do planeta (Wang, 2016). Nessa perspectiva, Rossato (2017) analisou a relação entre a umidade do solo e a produtividade agrícola e verificou que culturas agrícolas respondem melhor em solos com maior capacidade de infiltração e retenção hídrica.

A umidade do solo também exerce influência sobre a previsão de precipitação por meio de modelos numéricos. Koster (2005), utilizando o experimento *Global Land-Atmosphere Coupling Experiment* (GLACE), observou que a umidade do solo tem impacto significativo no regime de chuvas, tanto em regiões áridas quanto úmidas.

Entre os métodos mais utilizados para medir a umidade do solo está a reflectometria no domínio do tempo (TDR), que relaciona a constante dielétrica do solo úmido ao conteúdo volumétrico de água. Essa técnica proporciona alta precisão na caracterização da umidade superficial (Campbell, 1990; Greco & Guida, 2008; Santos, 2011). No entanto, métodos in situ apresentam limitações quanto à escala espacial por dependerem de medições pontuais, o que dificulta análises de grande abrangência (Wang et al., 2011; Rossato, 2010).

Nesse cenário, o sensoriamento remoto surge como alternativa para obtenção de dados da umidade do solo em escala global, evolução que se intensificou nos últimos anos (Wang et al., 2011; Mohanty et al., 2017). A determinação da umidade pode ser feita por diferentes faixas do espectro eletromagnético, cada uma com suas particularidades. No infravermelho, a estimativa é realizada por variações na reflectância ou nas propriedades térmicas do solo; porém, esse tipo de dado é bastante sensível à interferência atmosférica, dificultando análises de longo prazo (Wang, 2009; Zhang & Zhou, 2016).

METODOLOGIA

Caracteriza-se por possuir natureza aplicada, com objetivo principal de utilizar conhecimentos teóricos existentes para resolver um problema real (necessidade de monitoramento eficiente da umidade do solo em aplicações agrícolas). Thiollent (2025) destaca que a pesquisa aplicada se concentra em situações concretas, propondo diagnósticos e soluções voltadas às demandas de grupos, instituições ou contextos de uso, como é o caso da agricultura de precisão.

Quanto à abordagem, é quantitativo, uma vez que envolve a coleta, análise e interpretação de dados numéricos obtidos pelo sensor. Leituras de umidade são expressas em valores contínuos, permitindo mensuração, comparação e avaliação da precisão do dispositivo. Assim, os resultados podem ser analisados objetivamente, garantindo confiabilidade às conclusões.

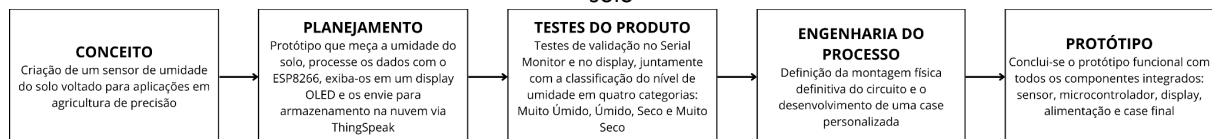
Em relação ao caráter, a pesquisa apresenta componentes exploratórios e descritivos. É exploratória, porque inicialmente buscou compreender o funcionamento de sensores de umidade, tecnologias embarcadas e plataformas de conectividade, constituindo uma base conceitual para o desenvolvimento do protótipo. Segundo Gil (2019), pesquisas exploratórias permitem maior familiaridade com o problema, tornando-o mais claro e viabilizando a formulação de soluções.

Portanto, para criar um produto, é necessário reunir informações e conhecimentos de diferentes áreas, tornando essa atividade naturalmente multidisciplinar. O processo foi considerado sob a ótica organizacional, ou seja, como uma sequência de atividades planejadas, com entradas e saídas, realizadas em uma ordem lógica e com um objetivo final claro (Davenport, 1994; Rozenfeld et al., 1998). Assim, torna-se possível compreender como será realizado o desenvolvimento deste protótipo. Segundo Clark e Fujimoto (1991), o desenvolvimento de produtos pode ser dividido, de forma geral, em 5 fases:

1. Conceito do produto;
2. Planejamento;
3. Engenharia e testes do produto;
4. Engenharia do processo;
5. Produção piloto/protótipo.

Com o exposto, serão abordadas as etapas para o desenvolvimento do protótipo, adequando-as ao contexto atual (Figura 1).

Figura 1. Fases feitas neste estudo para desenvolvimento do protótipo para monitoramento de umidade do solo



Fonte: Autores (2025).

Na prática, essas fases não acontecem uma de cada vez. Elas acontecem ao mesmo tempo e se influenciam mutuamente, pois o desenvolvimento envolve pensar em alternativas, construir, testar e ajustar o projeto constantemente, além da interação contínua entre as equipes (Rozenfeld, 1996).

O conceito do produto desenvolvido consiste na criação de um sensor de umidade do solo voltado para aplicações em agricultura de precisão. O objetivo principal do trabalho foi elaborar um dispositivo capaz de medir a umidade utilizando um sensor resistivo de solo, realizar o tratamento dos dados por meio do microcontrolador ESP8266 e exibir as informações em um display OLED 128x64 0.96" I2C, permitindo a análise em tempo real das condições do solo. Além da visualização local, o sistema foi integrado à plataforma IoT, possibilitando a coleta, o envio e o armazenamento remoto dos dados em nuvem.

Após a montagem do circuito, foram realizados testes de validação no Serial Monitor e no display. No Serial Monitor, o valor lido pelo sensor (escala de 0 a 1024) é exibido juntamente com a classificação do nível de umidade em quatro categorias: *Muito Úmido*, *Úmido*, *Seco* e *Muito Seco*. Já no display OLED, as informações são apresentadas de forma dinâmica, com título, valor numérico da leitura e condição correspondente, sendo atualizadas a cada segundo.

Para a construção do protótipo foram utilizados os seguintes materiais: Sensor resistivo de umidade de solo (Higrômetro HW-080), responsável pela medição da umidade; protoboard e jumpers, utilizados para a montagem inicial sem solda; ESP8266 Mini, encarregado do processamento dos dados e do envio das informações via Wi-Fi; placa de fenolite, aplicada posteriormente para a montagem definitiva do circuito; bateria de lítio 2000 mAh, garantindo autonomia energética; e o display OLED 0.96", que permite a visualização das informações coletadas diretamente no dispositivo.

A programação do sistema foi realizada na plataforma Arduino IDE, onde foram importadas bibliotecas essenciais, como ESP8266WiFi.h para a conexão sem fio e ThingSpeak.h para a comunicação com o serviço em nuvem. Foram configuradas as credenciais de acesso à rede Wi-Fi e definida a API Key do canal criado na plataforma. No loop principal do código, o envio das leituras é feito por meio do comando ThingSpeak.writeField. A cada envio, verifica-se o código de retorno: caso seja 200, indica sucesso no armazenamento; caso contrário, é registrado erro e o envio é tentado novamente.

Para a etapa de acabamento físico do dispositivo, foi desenvolvida uma case personalizada. Partiu-se de um modelo existente no GitHub, que foi ajustado de acordo com as dimensões e disposição interna dos componentes. Diversos protótipos foram impressos até que o tamanho e a ergonomia fossem validados.

A versão final apresenta dimensões de 70 mm de comprimento, 90 mm de largura e 60 mm de altura, com uma abertura na tampa para a visualização da tela. A impressão foi realizada em uma impressora 3D de alta precisão, utilizando um software de fatiamento compatível para preparar o modelo e ajustar os parâmetros de impressão. No entanto, não foi realizada uma calibração experimental formal, o que limita a avaliação da precisão do sensor.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos referem-se à validação funcional do protótipo de monitoramento de umidade do solo desenvolvido. Nesta etapa, o sistema foi avaliado quanto ao seu funcionamento e à capacidade de registrar variações de umidade, e não quanto à obtenção de medições quantitativas extremamente precisas. Nesse contexto, os valores registrados pelo sensor devem ser interpretados como indicadores qualitativos de tendência de umidade, uma vez que não foi realizada uma calibração experimental do sensor. Assim, os dados obtidos permitem identificar variações relativas nas condições do solo (mais seco ou mais úmido), mas não representam valores absolutos exatos de umidade.

CONCEITO DO PRODUTO

A etapa conceitual envolveu a definição da necessidade principal: criar um protótipo capaz de medir a umidade do solo em tempo real e disponibilizar esses dados remotamente, possibilitando aplicações futuras em agricultura de precisão. O direcionamento orientou todas as decisões subsequentes, desde a escolha do sensor resistivo HW-080 e do microcontrolador ESP8266 até a seleção da plataforma *ThingSpeak*® para a transmissão e análise dos dados.

A escolha dos componentes utilizados no protótipo foi guiada pela necessidade de desenvolver uma solução de custo reduzido, fácil implementação e adequada ao monitoramento em tempo real da umidade do solo. O sensor resistivo de umidade HW-080 foi selecionado por sua simplicidade, ampla disponibilidade e capacidade de fornecer leituras diretas da variação de condutividade do solo, atendendo aos requisitos do estudo.

O microcontrolador escolhido oferece conectividade sem fio integrada, processamento suficiente para tratar os dados coletados e compatibilidade com diferentes bibliotecas de desenvolvimento, o que facilita a implementação. Para o armazenamento e análise remota, a plataforma *ThingSpeak*® possibilita o envio contínuo das informações, visualização gráfica e registro histórico em nuvem, sem necessidade de infraestrutura própria.

Apesar de atender aos requisitos funcionais do protótipo, o conjunto de componentes adotado apresenta algumas limitações técnicas que devem ser consideradas. O sensor de umidade, embora simples e de solução economicamente viável, apresenta suscetibilidade à

oxidação e degradação ao longo do tempo, o que pode comprometer a estabilidade das medições. Além disso, sua resposta é fortemente influenciada por características físicas e químicas do solo, demandando calibrações frequentes para garantir maior confiabilidade.

O microcontrolador selecionado, apesar de oferecer conectividade Wi-Fi integrada, possui limitações de processamento e consumo energético que podem afetar aplicações em larga escala ou de longa duração. No que diz respeito à plataforma de armazenamento em nuvem utilizada, embora gratuita e de fácil integração, ela apresenta restrições quanto à taxa de atualização, volume de dados e opções avançadas de análise.

Como alternativas futuras, podem ser incorporados sensores capacitivos, que apresentam maior durabilidade e resistência à corrosão, além de oferecerem medições mais estáveis. Para ampliar a eficiência do sistema, microcontroladores com menor consumo energético e suporte a múltiplos protocolos de comunicação, como LoRaWAN ou Zigbee, podem ser considerados, especialmente em aplicações distribuídas.

Ademais, a integração com plataformas de IoT mais robustas ou servidores próprios pode ampliar a capacidade de armazenamento, personalização das análises e autonomia do sistema. O uso de métodos avançados de calibração, como modelos matemáticos ou aprendizado de máquina, também pode melhorar significativamente a precisão das medições em diferentes tipos de solo.

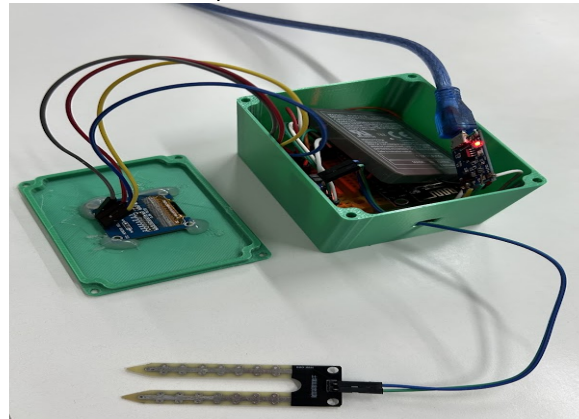
PLANEJAMENTO

No planejamento, além da definição dos componentes e requisitos funcionais, também foram consideradas as principais limitações do sistema, como a dependência de alimentação por bateria, o alcance restrito da conectividade Wi-Fi e a necessidade de uma estrutura física que garantisse proteção e estabilidade aos componentes. Nessa etapa, optou-se pelo uso de impressão 3D para a construção da case, devido ao baixo investimento, à acessibilidade da tecnologia e à possibilidade de personalização das dimensões e do formato conforme a disposição interna do hardware.

Entretanto, observa-se que o planejamento poderia ter incluído uma análise mais crítica de problemas previsíveis, como o tempo reduzido de autonomia energética e as limitações impostas pelo Wi-Fi em ambientes agrícolas extensos, que frequentemente apresentam baixa cobertura de rede. A identificação antecipada desses obstáculos teria permitido explorar alternativas ainda na fase inicial, como protocolos de comunicação de longo alcance ou estratégias de gerenciamento energético mais eficientes.

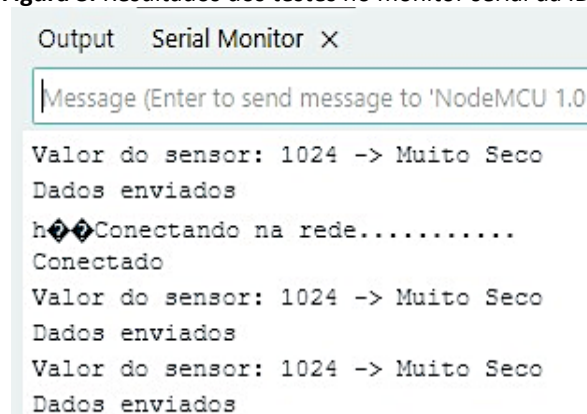
ENGENHARIA E TESTES DO PRODUTO

Essa fase contempla a definição da montagem física do circuito e o desenvolvimento de uma case personalizada capaz de abrigar todos os componentes, incluindo um espaço dedicado para a visualização do display. A etapa de criação da case (Figura 2) foi uma das mais trabalhosas do processo. Foram necessários diversos testes, ajustes dimensionais e reimpressões até que o invólucro comportasse adequadamente todos os componentes, garantindo estabilidade mecânica e espaço para as conexões, o display OLED e a bateria. A impressão 3D foi realizada utilizando filamento PLA, escolhido por sua boa resistência estrutural, facilidade de impressão, baixa deformação térmica e custo acessível, características que o tornam especialmente adequado para prototipagem rápida e desenvolvimento de dispositivos experimentais.

Figura 2. Case feita em impressora 3D com o sensor em seu interior

Fonte: Autores (2025).

A implementação do protótipo possibilitou validar a operação integrada do sensor HW-080, do ESP8266 e da plataforma *ThingSpeak*®. As leituras mostraram consistência durante os testes, tanto no Serial Monitor quanto no display OLED, comprovando o funcionamento do sistema de medição e transmissão de dados em tempo real. Assim, apresenta-se os valores exibidos no monitor serial da IDE, coletados pelo sensor de umidade do solo durante os testes iniciais. Os testes foram conduzidos no Laboratório de Metrologia da Universidade Federal de Lavras, no campus de São Sebastião do Paraíso-MG, garantindo um ambiente controlado e adequado para a validação do protótipo (Figura 3).

Figura 3. Resultados dos testes no monitor serial da IDE

Fonte: Autores (2025).

Apresenta-se a seguir o conjunto de dados coletados automaticamente pela plataforma IoT durante os testes experimentais realizados com o sensor de umidade do solo. Para essa avaliação, utilizou-se um vaso contendo terra seca, no qual pequenas quantidades de água foram adicionadas gradualmente, permitindo acompanhar em tempo real a variação da resposta elétrica do sensor (Tabela 1).

Tabela 1. Resumo das medidas de umidade registradas

Faixa de Valor (0–1024)	Nº de Registros	Interpretações
1024	102+ registros	Valor predominante, indica solo extremamente seco ou ausência de contato adequado com o solo
1021 a 1000	6 registros	Pequena variação inicial indicando leve mudança de resistência
999 a 950	4 registros	Indica início de redução da resistência do sensor
949 a 900	3 registros	Faixa intermediária, sugerindo umidade moderada
899 a 800	3 registros	Indica aumento da umidade
799 a 700	2 registros	Sensor detectou umidade mais elevada
≤ 600	0 registros	Faixa geralmente associada a alta umidade, o que não ocorreu nos dados

Fonte: Autores (2025).

À medida que a umidade do solo aumentava, observou-se uma queda imediata nos valores registrados, uma vez que, nessa escala, leituras próximas de 1024 correspondem a solo mais seco, enquanto valores menores indicam maior umidade. O registro contínuo dessas medições possibilitou analisar o comportamento do solo frente à saturação hídrica e validar o correto funcionamento do sensor HW-080, evidenciando sua sensibilidade e coerência diante das mudanças no nível de umidade.

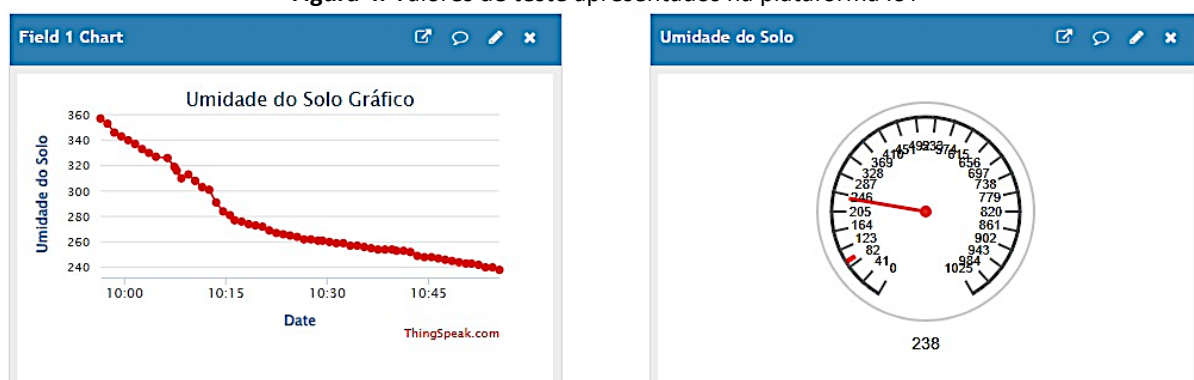
A análise dos registros enviados à plataforma IoT mostra que o sistema realizou medições em intervalos regulares de aproximadamente 20 segundos. A periodicidade é observada pela diferença constante entre os horários das leituras consecutivas, indicando que o dispositivo estava configurado para coletar e transmitir os dados do sensor a cada cerca de 20 segundos.

Durante a fase de coleta de dados, devido ao tempo limitado disponível para a execução do experimento, não foi realizada uma calibração experimental, sendo adotada apenas a configuração padrão do sensor, ou seja, a calibração de fábrica que apresenta precisão satisfatória de acordo com o *datasheet* do sensor. De fato, a implementação de um processo de calibração permitiria melhorar a confiabilidade das medições, porém, pequenas variações na precisão de medição não afetam os resultados esperados para o caso em questão. Em geral, esse procedimento pode ser realizado por meio de uma calibração analógica, considerada mais adequada para análises contínuas. Nesse procedimento, são coletados valores brutos do sensor em condições extremas de umidade, como solo completamente seco e solo totalmente saturado. Valores dessa natureza servem como referências para a construção de uma curva de calibração no software, possibilitando a conversão da leitura analógica em uma escala percentual de umidade do solo. Dessa forma, a ausência de calibração neste estudo constitui uma limitação do protótipo em termos de precisão quantitativa de produto.

ENGENHARIA DO PROCESSO

A etapa de integração com a plataforma IoT constituiu um componente essencial, pois permitiu estruturar o fluxo de comunicação entre o protótipo e a nuvem. Nesse período, foi criada e configurada uma conta dedicada, definindo-se canais específicos, campos de leitura e a taxa de envio dos dados, o que assegurou a consistência das transmissões e possibilitou a análise contínua dos valores registrados. Os gráficos abaixo (Figura 4) ilustram essa organização: enquanto o painel numérico facilita a leitura direta da umidade, o gráfico temporal revela claramente o comportamento do sensor, destacando a queda progressiva dos valores conforme a água era adicionada ao solo durante os testes.

Figura 4. Valores de teste apresentados na plataforma IoT



Fonte: Autores (2025).

A análise detalhada dos dados coletados permitiu observar não apenas o comportamento hídrico do solo, mas também aspectos operacionais do próprio dispositivo. As leituras foram enviadas em intervalos regulares de aproximadamente 20 segundos, evidenciando estabilidade no funcionamento do sistema entre 17:18:36 e 17:42:38. Após esse período, ocorreu uma interrupção abrupta de aproximadamente 50 minutos, sem novos registros na plataforma.

Esse padrão é característico da perda de alimentação do microcontrolador, indicando que o sistema provavelmente foi desligado devido à descarga da bateria, retomando a transmissão apenas às 18:32:44. Dessa forma, os gráficos apresentados na dashboard atuaram não apenas como ferramenta de visualização da umidade do solo, mas também como mecanismo indireto de diagnóstico do funcionamento e da autonomia energética do protótipo.

Cabe destacar que a autonomia reduzida observada no experimento não está associada a limitações estruturais do sistema eletrônico, mas sim à bateria utilizada durante os testes. A bateria empregada no protótipo já havia sido utilizada previamente em outros projetos e apresentava desgaste decorrente de ciclos anteriores de carga e descarga, o que comprometeu sua capacidade de armazenamento energético.

Assim, a interrupção observada deve ser interpretada como uma limitação experimental do teste, e não como uma restrição técnica da arquitetura do sistema. Em condições ideais, com o uso de baterias novas ou de maior capacidade, espera-se uma autonomia significativamente superior. Além disso, futuras versões do protótipo podem incorporar estratégias de otimização energética, como modos de economia de energia do microcontrolador (modo *Deep Sleep* do ESP8266) e ajustes na frequência de transmissão de dados, o que tende a ampliar ainda mais a duração operacional do dispositivo.

Embora os dados tenham sido categorizados inicialmente nas faixas “Muito Úmido”, “Úmido”, “Seco” e “Muito Seco”, essa classificação evidenciou as limitações técnicas do sensor resistivo utilizado. Os sensores são sensíveis a fatores como oxidação, salinidade e variações de temperatura, o que reforça a necessidade de calibração experimental futura.

PROTÓTIPO

O protótipo atual, construído em *proto-board* e interligado por jumpers, cumpriu adequadamente sua função na fase de validação inicial; entretanto, apresentou fragilidades típicas desse tipo de montagem, como desconexões acidentais, sensibilidade a vibrações e dificuldade de acomodação dos componentes dentro da case. Os aspectos evidenciam o caráter transitório do arranjo e reforçam que, na etapa de produção piloto, o produto já demonstra funcionalidade, mas ainda necessita de aprimoramentos estruturais para atingir robustez e confiabilidade.

A Figura 5 abaixo ilustra o sensor de umidade inserido diretamente no solo com a adição de água durante os testes experimentais. A imagem evidencia o contato físico necessário entre a sonda e o solo para que o sensor possa medir a condutividade e, conseqüentemente, o nível de umidade. Observa-se que a quantidade de água aplicada influencia diretamente os valores registrados, permitindo acompanhar em tempo real a resposta do sensor às variações de saturação do solo.

Figura 5. Protótipo IOT coletando informações relacionadas a umidade do solo e sensor em contato direto com o solo úmido durante testes



Fonte: Autores (2025).

Destacam-se algumas limitações relacionadas ao hardware empregado no protótipo. O sensor resistivo de umidade do solo utilizado, mantido em contato contínuo com o solo úmido durante os testes, apresenta durabilidade limitada devido à corrosão eletrolítica e às variações de condutividade do solo. Embora esse tipo de sensor seja amplamente utilizado em testes iniciais e validação de protótipos por sua simplicidade e tecnologia acessível, sua aplicação em monitoramento contínuo em campo pode resultar em degradação progressiva do material e perda de confiabilidade das medições. Nesse sentido, em versões futuras do dispositivo, a substituição por sensores capacitivos ou transdutores com proteção anticorrosiva constitui uma alternativa mais adequada para aplicações de longa duração.

Além da limitação associada ao sensor, algumas melhorias estruturais também foram identificadas durante o desenvolvimento do protótipo. Destacam-se a necessidade de vedação mais eficaz da carcaça, proteção contra infiltração de umidade, melhor acomodação dos cabos e transição para uma placa de circuito impresso (PCB). A adoção da PCB tende a reduzir falhas mecânicas associadas a conexões temporárias, além de padronizar o *layout* eletrônico e facilitar a integração dos componentes com a estrutura física do dispositivo.

Outro aspecto relevante refere-se ao sistema de alimentação. A bateria de 2000 mAh utilizada nos testes demonstrou autonomia limitada, sendo adequada principalmente para experimentos de curta duração. Dessa forma, para aplicações em campo, torna-se recomendável a adoção de soluções energéticas mais robustas, como baterias de maior capacidade associadas a sistemas de recarga por painéis solares e circuitos de gerenciamento de energia, o que pode ampliar significativamente a autonomia operacional do dispositivo.

Por fim, nota-se que a dependência exclusiva de comunicação via Wi-Fi restringe o uso do protótipo em áreas rurais com cobertura limitada de rede. Como alternativa, tecnologias de comunicação de longo alcance e baixo consumo energético (LoRa, NB-IoT ou redes via satélite) ofertam potencial de ampliar a viabilidade de seu uso.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento do protótipo de sensor de umidade para aplicações em agricultura de precisão demonstrou a viabilidade de criar uma solução funcional, de baixo custo e capaz de monitorar o solo em tempo real. A integração do sensor resistivo HW-080, do microcontrolador ESP8266, do display OLED e da plataforma IoT permitiu a coleta, visualização e transmissão remota de dados de forma consistente, cumprindo o objetivo central de validar o conceito do dispositivo.

Entre as limitações identificadas, destacam-se a montagem provisória em protoboard, que compromete a robustez estrutural dentro da case; a necessidade de calibração mais precisa do sensor, devido à sensibilidade à oxidação e à composição do solo; a dependência de conectividade Wi-Fi, limitada em áreas rurais; e a autonomia restrita da bateria em uso contínuo.

Os próximos passos incluem a criação de uma placa de circuito impresso para aumentar durabilidade e confiabilidade, a adoção de soluções energéticas renováveis, como painéis solares, a implementação de calibração experimental rigorosa e a exploração de tecnologias de comunicação de longo alcance, como LoRaWAN, NB-IoT ou redes via satélite. Também é possível ampliar o valor do sistema com alertas automáticos, integração com irrigação inteligente e algoritmos preditivos para otimizar o manejo hídrico.

Dessa forma, conclui-se que o protótipo desenvolvido é uma prova de conceito viável, com potencial de evolução para uso em campo real. Com ajustes estruturais, calibração e fontes de energia e conectividade mais robustas, o dispositivo pode se tornar uma ferramenta prática e confiável para a agricultura digital, contribuindo para o monitoramento eficiente e sustentável da umidade do solo.

AGRADECIMENTOS

Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro e institucional, que contribuiu significativamente para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- Lira, R. V. de A., Freire, C. R., Da Silva, I. B. T., Neto, V. P. da S., de Oliveira, J. G. D., de Andrade, H. D., & Campos, A. L. P. de S. (2024). A compact CSRR-based microwave sensor for soil water content. *Sensors and Actuators A: Physical*, 370, 115211. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2024.115211>
- Bambini, M. D., Bonacelli, M. B. M., HIGA, R., BONACELLI, M. B. M., & HIGA, R. H. (2018). *Pesquisa agropecuária no contexto da e-science: monitoramento de temas e plataformas de data science*.
- Barbedo, J. G. A. & Meira, C. A. A. (2014). *TIC na segurança fitossanitária das cadeias produtivas*. Massruhá, S. M. F. S., Leite, M. A. de A., Luchiari Jr., A., 159-189.
- Buainain, A. M., Alves, E., Silveira, J. M., & Navarro, Z. (2014). O mundo rural no Brasil do século 21. *Embrapa*: Brasília, Brazil.
- Buainain, A. M., Cavalcante, P., & Consoline, L. (2021). Estado atual da agricultura digital no Brasil: inclusão dos agricultores familiares e pequenos produtores rurais (No. 46958). *Naciones Unidas Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)*.
- Campbell, J. E. (1990). Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Science Society of America Journal*, 54(2), 332-341.
- Carvalho, N. G. P. (2019). Trabalho humano na indústria 4.0: percepções brasileiras e alemãs dos setores acadêmico e empresarial a respeito do trabalho de pessoas no novo modelo industrial (Doctoral dissertation, *Universidade de São Paulo*).
- Cirani, C. B. S. & Moraes, M. A. F. D. D. (2010). Inovação na indústria sucroalcooleira paulista: os determinantes da adoção das tecnologias de agricultura de precisão. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 48, 543-565.
- Clark, K. B. (1991). *Product development performance: strategy, organization, and management in the world auto industry*.
- Da Silva Gomes, C., Procópio, D. P., Arruda-Oliveira, J. C., Lima, H. J. D. A., & da Silva, R. B. B. (2024). Modernização agropecuária no Brasil. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 17(4), e12845-e12845.
- Earthdata NASA. (2024). Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E). Recuperado de <https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/amse>
- Gerhardt, T. E. & Silveira, D. T. (2009). Métodos de pesquisa. *Plageder*.
- Gil, A. C. & Vergara, S. C. (2015). Tipo de pesquisa. *Universidade Federal de Pelotas*. Rio Grande do Sul, 31.
- Greco, R. & Guida, A. (2008). Field measurements of topsoil moisture profiles by vertical TDR probes. *Journal of Hydrology*, 348(3-4), 442-451.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016, January). Design principles for industrie 4.0 scenarios. In *2016 49th Hawaii international conference on system sciences (HICSS)* (pp. 3928-3937). *IEEE*.
- Kerr, Y. H., Waldteufel, P., Wigneron, J. P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., ... & Mecklenburg, S. (2010). The SMOS mission: new tool for monitoring key elements

of the global water cycle. *Proceedings of the IEEE*, 98(5), 666-687.

Khan, N., Ray, R. L., Sargani, G. R., Ihtisham, M., Khayyam, M., & Ismail, S. (2021). Current progress and future prospects of agriculture technology: gateway to sustainable agriculture. *Sustainability*, 13(9), 4883.

Kiehne, J. & Olaru, M. (2017). Implementing Industrie 4.0 strategies: beyond technical innovations. In *Basiq International Conference: new trends in sustainable business and consumption* (pp. 363-371).

Klerkx, L., Jakku, E., & Labarthe, P. (2019). A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: new contributions and a future research agenda. *NJAS-Wageningen journal of life sciences*, 90, 100315.

McColl, K. A., Alemohammad, S. H., Akbar, R., Konings, A. G., Yueh, S., & Entekhabi, D. (2017). The global distribution and dynamics of surface soil moisture. *Nature Geoscience*, 10(2), 100-104.

Mihret, Y. C., Takele, M. M., & Mintesinot, S. M. (2025). Advancements in agriculture 4.0 and the needs for introduction and adoption in Ethiopia: a review. *Advances in Agriculture*, 2025(1), 8828400.

Padhee, S. K., Nikam, B. R., Dutta, S., & Aggarwal, S. P. (2017). Using satellite-based soil moisture to detect and monitor spatiotemporal traces of agricultural drought over Bundelkhand region of India. *GIScience & Remote Sensing*, 54(2), 144-166.

Rozenfeld, H., Aguiar, A. S., Oliveira, C., & Omokawa, R. (1998). *Development of a concurrent engineering scenario for educational purposes*.

Rozenfeld, H. & Amaral, D. C. (2006). Gestão de projetos em desenvolvimento de produtos. São Paulo: Saraiva.

Salerno, M. S. (1999). Projeto de organizações integradas e flexíveis. São Paulo: Atlas, 11.

Saniuk, S., Grabowska, S., & Gajdzik, B. (2020). Personalization of products in the industry 4.0 concept and its impact on achieving a higher level of sustainable consumption. *Energies*, 13(22), 5895.

Santos, V. S. & Kienzle, J. (2020). Agriculture 4.0-agricultural robotics and automated equipment for sustainable crop production.

Schwab, K. (2016). The Fourth Industrial Revolution. Geneva: *World Economic Forum*, 2016.

Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I., ... & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture-climate interactions in a

changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*, 99(3-4), 125-161.

Silva Santos, N. C., & Da Silva, W. A. (2019). Desafios e possibilidades da sustentabilidade na agricultura. *Revista GeoSertões*, 4(7), 10-25.

Silveira, F., Barbedo, J. G. A., da Silva, S. L. C., & Amaral, F. G. (2023). Proposal for a framework to manage the barriers that hinder the development of agriculture 4.0 in the agricultural production chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 214, 108281.

Stephen, S., Alexander, K., Potter, L., & Palmer, X. L. (2023). *Implications of cyberbiosecurity in advanced agriculture*.

Thiollent, M. (2025). Metodologia da pesquisa-ação. Cortez editora.

Tortorella, G. L., & Fettermann, D. (2018). Implementation of Industry 4.0 and lean production in Brazilian manufacturing companies. *International journal of production research*, 56(8), 2975-2987.

Vereecken, H., Huisman, J. A., Pachepsky, Y., Montzka, C., Van Der Kruk, J., Bogaen, H., ... & Vanderborght, J. (2014). On the spatio-temporal dynamics of soil moisture at the field scale. *Journal of Hydrology*, 516, 76-96.

Wang, W., Ertsen, M. W., Svoboda, M. D., & Hafeez, M. (2016). *Propagation of drought: from meteorological drought to agricultural and hydrological drought*.

Weyer, S., Schmitt, M., Ohmer, M., & Gorecky, D. (2015). Towards Industry 4.0-Standardization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production systems. *Ifac-Papersonline*, 48(3), 579-584.

Wheelwright, S. C. & Clark, K. B. (1992). Revolutionizing product development: quantum leaps in speed, efficiency, and quality. *Simon and Schuster*.

Wigneron, J. P., Schmugge, T., Chanzy, A., Calvet, J. C., & Kerr, Y. H. (1998). Use of passive microwave remote sensing to monitor soil moisture. *Agronomie*, 18(1), 27-43.

Yazdinejad, A., Zolfaghari, B., Azmoodeh, A., Dehghantanha, A., Karimipour, H., Fraser, E., ... & Duncan, E. (2021). A review on security of smart farming and precision agriculture: Security aspects, attacks, threats and countermeasures. *Applied Sciences*, 11(16), 7518.

Zhang, D. & Zhou, G. (2016). Estimation of soil moisture from optical and thermal remote sensing: A review. *Sensors*, 16(8), 1308.