UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DESENVOLVIMENTO DE UM TENSIÔMETRO AUTOMATIZADO COM ESP32 PARA MONITORAMENTO CONTÍNUO DA TENSÃO DA ÁGUA NO SOLO

DANIEL HENRIQUE LORENTE

Jaboticabal – SP

2026

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DESENVOLVIMENTO DE UM TENSIÔMETRO AUTOMATIZADO COM ESP32 PARA MONITORAMENTO CONTÍNUO DA TENSÃO DA ÁGUA NO SOLO

Daniel Henrique Lorente

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri

Coorientador: Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP, Câmpus de Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

Jaboticabal
1° Semestre/2026

L868d

Lorente, Daniel Henrique

Desenvolvimento de um tensiômetro automatizado com ESP32 para monitoramento contínuo da tensão da água no solo / Daniel Henrique Lorente. -- Jaboticabal, 2026

56 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agronômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Alexandre Bercellos Dalri

Coorientador: Rogério Teixeira de Faria

1. Internet das coisas. 2. Tensiômetros. 3. Agricultura de precisão. 4. Irrigação. 5. Automação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus Jaboticabal

Daniel Henrique Lorente

Desenvolvimento de um Tensiômetro Automatizado com ESP32 para Monitoramento Contínuo da Tensão da Água no Solo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em **Engenharia Agronômica**.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri

Coorientador (se houver): Prof. Dr. Rogério Teixeira de Faria

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Trabalho aprovado em 06/07/2026

Banca Examinadora:

gov.br
Documento assinado digitalmente
ALEXANDRE BARCELLOS DALRI
Data: 07/07/2026 18:33:59-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri
UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

gov.br
Documento assinado digitalmente
ANDERSON PRATES COELHO
Data: 07/07/2026 20:58:27-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Anderson Prates Coelho
UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - Campus de Jaboticabal

Assinado digitalmente por SANTO OLIANI JUNIOR:31894721810
ND: C=BR, O=ICP-Brasil, OU=Secretaria da Receita Federal do Brasil - RFB, OU=RFB e-CPF A1, OU=AC VALID RFB V5, OU=AR CARDS, OU=Videoconferencia, OU=25449435000149, CN=SANTO OLIANI JUNIOR:31894721810
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: Jboticabal / SP
Data: 2026.07.07 22:22:10-03'00'
Foxit PDF Editor Versão: 2023.1.0

Tecnólogo em Processamento de Dados Santo Oliani Junior
CTA - Colégio Técnico Agrícola "José Bonifácio" - Unesp-FCAV

gov.br
Documento assinado digitalmente
LUIZ FABIANO PALARETTI
Data: 09/07/2026 16:53:21-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti
Chefe do Departamento

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho primeiramente a Deus; sem Ele, eu não teria conseguido desenvolvê-lo e concluí-lo.

Em especial, dedico à minha família, minha rede de apoio e incentivo durante toda a minha vida. Dedico à minha mãe, Marta Maria da Silva Lorente Domingues, a quem devo tudo o que sou hoje, assim como ao meu pai, Daniel Lorente Domingues, que me impulsionou a seguir pelos caminhos que trilho atualmente, a custo de muito esforço e sacrifício, sendo meu maior exemplo de dedicação e superação. Não tenho palavras para descrever a magnitude de minha gratidão por eles.

Ofereço este trabalho ao meu querido e humilde orientador Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri, que me auxiliou, apoiou e agregou conhecimentos durante todo o processo de desenvolvimento desta pesquisa e ao longo de toda a minha graduação.

Também ofereço ao Prof. Santo Oliani Junior, exemplo de educador, que esteve presente com ideias e soluções, agregando conhecimentos ao trabalho e à minha carreira profissional.

Por fim, dedico este trabalho a todos os professores do curso de graduação em Engenharia Agronômica da Unesp-FCAV, pela dedicação, ao longo dos anos em não apenas formar profissionais para o mercado de trabalho, mas também cidadãos para a vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (Unesp/FCAV), e toda a comunidade acadêmica, por manterem a excelência da instituição.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre Barcellos Dalri, por toda a orientação durante a graduação, e pelos ensinamentos e conhecimentos compartilhados, que nunca serão esquecidos.

À minha família, por todo suporte e apoio incondicional para a elaboração deste trabalho e para a conclusão da minha graduação, assim como durante toda a minha vida.

Aos colegas e amigos próximos que fiz e tenho para toda a vida, que me acompanharam ao longo deste ciclo, oferecendo apoio, lazer e suporte durante todo o período de graduação.

SUMÁRIO

RESUMO ..... **IV**

ABSTRACT ..... **VI**

1. INTRODUÇÃO **1**

2. REVISÃO DE LITERATURA **4**

2.1. O Papel da Irrigação e a Eficiência Hídrica na Agricultura 4

2.2. Tensiometria e a Evolução do Monitoramento 6

2.3. Internet das Coisas (IoT) na Irrigação 11

3. MATERIAL E MÉTODOS **15**

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO **27**

5. CONCLUSÕES **37**

6. REFERÊNCIAS **38**

RESUMO

O presente estudo aborda o contexto da agricultura de precisão, que busca otimizar o uso de recursos hídricos através do monitoramento contínuo do potencial matricial e da tensão da água no solo. Apesar da extrema relevância agronômica desse controle, a barreira estrutural do alto custo e da elevada complexidade técnica para o acesso às inovações eletrônicas restringe a adoção dessa tecnologia no ambiente agrícola, fato que mantém a dependência de equipamentos analógicos tradicionais que dificultam a operação rotineira ao exigir a realização de leituras presenciais e manuais. Diante desta problemática, o presente trabalho desenvolve um tensiômetro integrado ao conceito de Internet das Coisas (IoT), concebido como uma alternativa automatizada que atua no monitoramento da tensão da água no solo. O trabalho desenvolve o hardware por meio da integração entre a placa ESP32 e o sensor eletrônico de pressão diferencial MPX5100DP. A metodologia utiliza a linguagem de programação C++ no ambiente de desenvolvimento integrado para codificar o microcontrolador, o que configura o dispositivo para processar os sinais elétricos do sensor e realizar a transmissão direta de dados via rede Wi-Fi para os painéis de visualização gráfica na nuvem da plataforma ThingSpeak. A etapa de validação compara estatisticamente a leitura digital emitida pelo protótipo com o dado analógico extraído de um tensiômetro de referência equipado com coluna de mercúrio convencional. O primeiro protótipo apresentou uma Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE) de 0,6307 kPa e um Erro Absoluto Médio (MAE) de 0,5617 kPa, enquanto o segundo protótipo marca um RMSE de 0,6320 kPa e um MAE de 0,5360 kPa. A análise estatística de regressão linear comprova a elevada linearidade do equipamento ao apontar um coeficiente de determinação (R^2) de 0,9987 e 0,9986 para os respectivos sensores. Adicionalmente, a aplicação do método analítico de Bland-

Altman indica um viés sistemático de 0,37 kPa e 0,45 kPa. Por fim, conclui-se que o desempenho estatisticamente preciso, aliado ao baixo erro operacional que não afeta a tomada de decisão agronômica, atesta a viabilidade técnica do dispositivo eletrônico como uma ferramenta escalável para a medição do potencial hídrico no solo.

Palavras-Chave: agricultura de precisão, Internet das Coisas, tensiômetro automatizado, ESP32.

ABSTRACT

The present study addresses the context of precision agriculture, which seeks to optimize the use of water resources through continuous monitoring of matric potential and soil water tension. Despite the paramount agronomic relevance of such control, structural barriers, namely high costs and considerable technical complexity in accessing electronic innovations restrict the adoption of this technology in agricultural settings. Consequently, there remains a reliance on traditional analog equipment, which hinders routine operations by requiring manual, in-person reading. Considering this issue, this research develops a tensiometer integrated with the Internet of Things (IoT) framework, designed as an automated alternative for monitoring soil water tension. The hardware was developed by integrating an ESP32 microcontroller board with an MPX5100DP electronic differential pressure sensor. Methodologically, the microcontroller was programmed using C++ in an integrated development environment (IDE). This configuration enables the device to process the sensor's electrical signals and wirelessly transmit data via Wi-Fi to cloud-based graphical dashboards on the ThingSpeak platform. The validation phase statistically compared the digital readings generated by the prototype against analog data obtained from a reference tensiometer equipped with a conventional mercury column. The first prototype yielded a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.6307 kPa and a Mean Absolute Error (MAE) of 0.5617 kPa, whereas the second prototype recorded an RMSE of 0.6320 kPa and an MAE of 0.5360 kPa. Statistical analysis via linear regression confirmed the equipment's high linearity, demonstrating coefficients of determination (R^2) of 0.9987 and 0.9986 for the respective sensors. Additionally, the application of the Bland-Altman analytical method indicated systematic biases of 0.37 kPa and 0.45 kPa. In conclusion, the statistically precise performance, coupled with a low operational error that does not compromise

agronomic decision-making, attests to the technical viability of the electronic device as a scalable tool for measuring soil water potential.

Keywords: precision agriculture, Internet of Things, automated tensiometer, ESP32.

1. INTRODUÇÃO

A gestão de recursos hídricos se tornou um tema central no meio agronômico nos últimos anos. Em regiões onde há escassez de água, a discussão toma ainda mais força, tornando-se uma barreira real à produtividade agrícola e à segurança alimentar da população. Na média mundial a agricultura irrigada é responsável por cerca de 70% do consumo global de água (RODRIGUES; DOMINGUES, 2017). Diante desse cenário, tornou-se imprescindível realizar o manejo desses recursos de forma eficiente, principalmente em países em que a economia depende diretamente das práticas agrícolas.

A partir dessa necessidade, a agricultura de precisão ganha espaço, proporcionando tecnologias e métodos que permitem um controle mais rigoroso sobre o uso da água. Poder monitorar o potencial matricial da água no solo faz parte do conjunto de técnicas utilizadas para manejo hídrico na atualidade. Reichardt e Timm (2022), assim como Tsai et al. (2020), descrevem essa variável como uma leitura numérica da força com que a água fica retida pelas partículas do solo, indicando o que efetivamente está disponível para absorção radicular. Com essa informação em mãos, é possível embasar o manejo da irrigação, evitando desperdício hídrico e garantindo que a cultura possa expressar seu máximo potencial produtivo.

Entre as ferramentas utilizadas para essa finalidade, o tensiômetro é uma das mais utilizadas. Trata-se de um equipamento de monitoramento simples, de baixo custo e com correlações confiáveis com o real estado hídrico do solo (BERALDO; CORA; FERNANDES, 2012; BRITO et al., 2009). Porém, o impedimento para a adoção dessa tecnologia esbarra na rotina prática, pois a exigência de leituras presenciais e constantes limitam o uso do dispositivo. Além disso, os principais sistemas tradicionais ainda dependem de manômetros analógicos ou vacuômetros de

coluna de mercúrio, o que não apenas dificulta a operação rotineira, mas também agrega riscos ambientais e operacionais.

Diante dessas dificuldades operacionais, se torna evidente a necessidade de modernizar esse tipo de monitoramento. Para tal, o caminho mais viável é o desenvolvimento de soluções tecnológicas que integrem sensores eletrônicos de pressão a sistemas totalmente automatizados para a coleta e transmissão remota das leituras.

A partir deste ponto, os sistemas embarcados e as plataformas de prototipagem eletrônica de código aberto ganham destaque. Ao serem associados à transmissão de dados via redes locais sem fio (Wi-Fi), viabilizam uma conexão direta entre o microcontrolador e a internet. Essa integração possibilita a transferência instantânea de dados para plataformas de visualização e análise estatística em nuvem, abrindo novas perspectivas para o monitoramento contínuo no campo. Ding e Chandra (2019) demonstram a viabilidade do uso dessa tecnologia na agricultura digital, enquanto Gomes et al. (2024) complementam destacando a confiabilidade da transmissão de dados mesmo em áreas rurais extensas através da conectividade de rede em malha.

Unir o microcontrolador ESP32 com a conectividade Wi-Fi possibilita o desenvolvimento de sistemas integrados, incorporados à Internet das Coisas (IoT) no campo. Na prática, isso permite que o monitoramento de diversas variáveis agronômicas, como temperatura, umidade do solo, radiação solar e, de forma mais recente, do potencial matricial da água do solo, seja realizado de forma contínua e remota. A combinação de sensores eletrônicos de precisão com o envio direto de dados para a nuvem elimina a necessidade de módulos de comunicação intermediários. Autores como Abdelmoneim et al. (2025) e Zafar et al. (2018) demonstram como essa integração impulsiona a instalação de redes de dispositivos

independentes na propriedade agrícola. Isso resulta em uma coleta centralizada de dados em plataformas digitais, facilitando a rotina de gestão e tomadas de decisão.

Nesse sentido, integrar o ESP32 com redes locais sem fio (Wi-Fi) representa um salto prático no monitoramento hídrico, digitalizando tarefas que tradicionalmente exigiam idas diárias ao campo. Essa se torna a premissa central deste trabalho: utilizar o sensor de pressão MPX5100DP para captar a tensão da água no solo com precisão e transmitir essa informação de forma segura e contínua, criando uma alternativa tecnológica viável aos métodos analógicos tradicionais. O intuito não é apenas modernizar a leitura, mas contribuir diretamente para a adoção de uma irrigação baseada em dados (*data-driven irrigation*).

Para tanto, este trabalho tem como objetivo principal desenvolver um tensiômetro eletrônico utilizando o microcontrolador ESP32 com transmissão de dados via Wi-Fi, para medição contínua da tensão da água no solo, integrando a visualização de dados na plataforma em nuvem ThingSpeak, voltada para projetos de Internet das Coisas (IoT).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. O Papel da Irrigação e a Eficiência Hídrica na Agricultura

A prática de irrigar lavouras tem raízes antigas nas civilizações Mesopotâmica e Egípcia, expandindo ao longo dos séculos como resposta à necessidade de aumentar a produção agrícola em regiões áridas e semiáridas, representadas por cerca de 55% da área seca do planeta (LIMA; FERREIRA; CHRISTOFIDIS, 1999). Atualmente, mais da metade da população mundial depende diretamente de alimentos produzidos sob manejo irrigado, seguido pelo crescimento constante da área global para esta finalidade (CANTELLE; LIMA; BORGES, 2018).

No Brasil, por ser um país com condições climáticas mais favoráveis, a irrigação em larga escala é uma prática relativamente recente, tendo início entre o final do século XIX e início do século XX, principalmente através do cultivo de arroz no Rio Grande do Sul, posteriormente avançando para outras regiões como São Paulo, Minas Gerais e o Cerrado (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL), 2021). O crescimento se manteve acelerado desde os anos 1990, alcançando 6,11 milhões de hectares irrigados em 2014, seguido por uma adoção crescente de tecnologias como pivôs centrais e irrigação localizada (CANTELLE; LIMA; BORGES, 2018).

Como apontado por Lima, Ferreira e Christofidis (1999) e a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2021), esse processo de expansão foi impulsionado por fatores demográficos e econômicos. O crescimento populacional acelerado, seguido pelo processo de urbanização intensa aumentou a pressão por produção de alimentos em escala. O alto custo de terras e a necessidade de rentabilizar capital

investido tornaram inviável a dependência contínua de chuvas, tornando a irrigação uma ferramenta de gestão de risco para o agronegócio brasileiro.

A agricultura é responsável por cerca de 70% de toda a água doce retirada de fontes hídricas no mundo, chegando a 85% quanto ao consumo, e no Brasil a irrigação representa por 50% a mais de 60% da captação de água total (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL), 2021). A crescente demanda, somada às mudanças climáticas e fatores demográficos, tem provocado impactos severos como esgotamento de aquíferos e salinização de cerca de 20% das áreas irrigadas do mundo (FOLEY et al., 2005). Portanto, a otimização da irrigação se faz necessária, buscando alimentar os mais de 9 bilhões de pessoas esperados até 2050, exigindo um incremento de 70% da produção de alimentos, se tornando mais viável com uma intensificação mais sustentável dos sistemas de irrigação (CHRISTOFIDIS, 2013). O cenário é agravado pelo fato de que a eficiência média dos sistemas irrigados varia de 60 a 90% de acordo com a tecnificação do produtor rural, abrindo margem para potencial redução de desperdícios (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil), 2021; RODRIGUES; DOMINGUES; LINEU, 2017).

A transição para agricultura de precisão representa uma quebra com o modelo convencional de aplicação uniforme de água, que resulta em perdas significativas por lixiviação, evaporação e alto consumo de energia (SILVA; LIMA; ALVES, 2024). Essa evolução consolida a incorporação das Tecnologias da Informação e Comunicação no campo, através de sensores de umidade, temperatura e evapotranspiração conectados via IoT, que monitoram e acionam a irrigação quando os níveis hídricos do solo caem abaixo do necessário, e de sistemas de manejo em taxa variável que, integrados a GPS e mapas gerados por SIG, drones e satélites, permitem irrigar nas lâminas exatas na lavoura (INGRAO et al., 2023).

O avanço continua através da Agricultura 5.0, elevando a conectividade e eficiência a um nível preditivo e autônomo, com algoritmos de Machine Learning e Big Data capazes de prever safras, riscos de pragas e monitoramento exato da irrigação, incorporando redes 5G, computação em nuvem e blockchain para rastreabilidade da produção (GARCIA et al., 2024).

Ainda assim, a adoção plena dessas soluções por parte dos produtores rurais enfrenta barreiras estruturais de custo e complexidade técnica, tornando essencial o desenvolvimento de plataformas acessíveis, como sistemas baseados em Arduino, ESP32 e Raspberry Pi, além de políticas públicas que democratizem o acesso dessas tecnologias a pequenos e médios agricultores.

2.2. Tensiometria e a Evolução do Monitoramento

O potencial mátrico é expresso na engenharia agrícola como sendo Tensão da Água no Solo, valor que corresponde ao módulo positivo do potencial matricial, conceito físico que Reichardt (1987) define como quantificação do estado energético da água em função da interação com partículas físicas do solo, correspondendo diretamente a energia que as plantas precisam gastar para extrair água do solo. A retenção hídrica é regida pelo equilíbrio de forças capilares, que atuam nos microporos por meio da tensão superficial entre as moléculas de água, e força que exercem adsorção, como as força de London-van der Waals, que atraem moléculas de água para cargas elétricas negativas das partículas do solo, se tornando dominantes conforme ocorre a secagem do solo (BERALDO; CORA; FERNANDES, 2012). Portanto, quanto maior a tensão, ou quanto maior a força de retenção da água nos microporos e coloides, maior é o esforço metabólico que deverá ser realizado pelo

sistema radicular para absorção de água necessária para a manutenção do metabolismo e da transpiração das plantas (COELHO et al., 2011).

A relação entre o teor de umidade no solo e a energia que ela está retida é representada graficamente pela Curva de Retenção de Água no solo, ferramenta essencial para o estudo da dinâmica hídrica. O comportamento desse elemento gráfico é determinado pelos dois tipos de porosidade: a microporosidade textural e a macroporosidade estrutural, responsáveis respectivamente pela maior retenção de água e pela rápida infiltração e aeração do solo. A influência da porosidade é percebida ao comparar as curvas de retenção de solos arenosos, em que há curvas abruptas em tensões específicas, representando a drenagem simultânea de grande volume de água, enquanto solos argilosos apresentam decaimento gradual e suave, mantendo o teor de umidade elevado ao longo das faixas de tensões (ALMEIDA; ARAÚJO; SOUZA, 2010).

A partir da detecção de queda de umidade na rizosfera, as plantas apresentam uma complexa rede de respostas fisiológicas de escape, abrangendo desde o nível celular até a estrutura do dossel (PIMENTEL, 2004). Conforme descrito por Bianchi, Germino e Silva (2016) a resposta mais imediata é o fechamento estomático, mediado pelo hormônio ácido abscísico (ABA), produzido nas raízes e transportado pelo xilema até as folhas procurando reduzir diretamente a transpiração, enquanto em nível celular o ajuste osmótico mantém a turgescência em potencial hídrico baixo, com proteínas LEA e HSP estabilizando membranas desidratadas e aquaporinas regulando o fluxo hídrico transmembranar.

Os impactos produtivos do estresse hídrico são progressivos e potencialmente irreversíveis. A perda de turgescência paralisa o alongamento celular e o crescimento vegetativo da planta, em conjunto com o bloqueio da entrada de CO_2, reduzindo a

taxa fotossintética líquida. Em situações que há déficit mais severo, surgem limitações metabólicas não-estomáticas, como a desestruturação de cloroplastos, diminuição da síntese de ATP e inibição da regeneração da RuBP, interrompendo totalmente o acúmulo de matéria seca (LAWLOR, 2002). O impacto mais crítico ocorre quando a falta de água coincide com as fases de floração e enchimento de grãos, em que através da interrupção do fluxo de carbono, ocorre diretamente o abortamento de flores e enchimento inadequado de grãos, causando perdas drásticas de produtividade agrícola (DURIGON, 2011; PIMENTEL, 2004).

Visando o controle do déficit hídrico das plantas, o monitoramento do potencial matricial é considerado a estratégia mais confiável para o manejo da irrigação, pois atua diretamente na interface entre a física do solo e a fisiologia da planta. Diferente do teor de umidade, que informa apenas o volume quantitativo de água presente, a tensão expressa o estado energético em que a água está retida no solo, demonstrando o esforço exato que a planta precisa fazer para absorvê-la (SMAJSTRLA; PITTS, 1997).

O tensiômetro analógico tradicional é um instrumento amplamente adotado na medida da tensão do potencial matricial da água no solo. O instrumento é composto por três elementos essenciais: uma cápsula porosa de cerâmica, que atua como interface permeável em contato direto com o solo e atuando como barreira contra a entrada de gases no sistema fechado; uma coluna de água em tubo selado hermeticamente, conectando a cápsula ao medidor, possibilitando a redução da pressão interna; e um vacuômetro mecânico de Bourdon, responsável por registrar a tensão interna a partir da deformação de uma espiral mecânica que move o ponteiro no visor (RICHARDS, 1942).

O princípio operacional do tensiômetro se baseia no estabelecimento de um equilíbrio hidrostático dinâmico entre a solução do solo e a água presente no interior do equipamento (COELHO; TEIXEIRA, 2004). Em caso de o solo estar insaturado, a sucção exercida pela matriz do solo retira água do interior do tensiômetro através dos poros da cápsula de cerâmica, reduzindo a pressão interna e formando um vácuo parcial, devido à vedação hermética (FAGUNDES et al., 2011). Esse movimento da água encerra quando a pressão negativa interna é igualada ao potencial matricial do solo, levando a estabilização da leitura no vacuômetro. Por se tratar de um processo dinâmico e reversível, o tensiômetro responde a momentos de irrigações e chuvas, que causam o aumento da umidade do solo, promovendo o retorno da água para o interior do tubo e consequente redução da tensão registrada (COELHO; TEIXEIRA, 2004).

Apesar de sua ampla utilização e baixo custo no monitoramento da tensão da água no solo, o tensiômetro possui limitações críticas que comprometem a precisão e viabilidade operacional. Um dos principais limitantes é a inércia física da cápsula de cerâmica, que impõe um atraso no tempo de resposta do equipamento ao ocorrer variações rápidas do potencial matricial. Essa limitação é agravada ao longo do tempo de uso em campo, ocorrendo um bloqueio gradual dos poros por partículas, bolhas de ar e contaminantes, reduzindo a condutividade hidráulica (TSAI et al., 2020). Além disso, a confiabilidade das medições é prejudicada pela dependência da interpretação humana em escalas visuais graduadas, suscetibilizando a coleta de dados a erros e variações entre observadores (BERALDO; CORA; FERNANDES, 2012).

Além das restrições relacionadas a precisão, o monitoramento com instrumentos manuais impõe severas dificuldades logísticas. A necessidade de deslocamento constante ao campo para realização da leitura visual gera uma alta

demanda por tempo e mão-de-obra, dificultando o gerenciamento contínuo e inviabilizando a integração com sistemas modernos de irrigação de precisão (LOCONSOLE et al., 2025). A manutenção in loco também é constante e trabalhosa, visto que o equipamento sofre com o acúmulo de matéria orgânica nas cerâmicas e com o fenômeno físico da cavitação. Esses fatores refletem a necessidade de limpezas frequentes e a eliminação de bolhas de ar através do reabastecimento periódico com água desaerada, impondo obstáculos operacionais significativos para a aplicação prática dos tensiômetros em larga escala (BERALDO; CORA; FERNANDES, 2012; LOCONSOLE et al., 2025).

A substituição de vacuômetros mecânicos por transdutores de pressão eletrônicos, como o modelo MPX5100DP, supera as limitações de leitura visual, permitindo a digitalização contínua do potencial matricial (BRITO et al., 2009). O princípio de funcionamento desses sensores é fundamentado no efeito piezoresistivo, em que a pressão de vácuo no interior do tensiômetro deforma elasticamente uma membrana de silício microfabricada, alterando a resistividade dos piezoresistores integrados na própria membrana (CORAUCCI, 2008). Os resistores são organizados em um circuito de Ponte de Wheatstone, sofrendo um desbalanceamento proporcional à deformação quando submetidos a tensão, convertendo o estresse mecânico em um sinal diferencial de saída em milivolts (mV) proporcional ao vácuo aplicado, abrangendo sensibilidades médias de 42,833 mV por kPa (FAGUNDES et al., 2011; GARCIA, 2006).

A geração desse sinal elétrico contínuo é o fator que viabiliza a automação integral do monitoramento em campo, permitindo o envio contínuo das leituras para sistemas de aquisição de dados, como microcontroladores e coletores de dados (FAGUNDES et al., 2011). Ao ser recebido pelo equipamento, o sinal analógico passa

por um conversor analógico-digital, passando para dados quantitativos através de equações de calibração linear (COELHO; TEIXEIRA, 2004). Com essa digitalização, elimina-se a necessidade de deslocamento humano para realização da interpretação de escalas graduadas, viabilizando o registro de dados e o desenvolvimento de um histórico minucioso da dinâmica da secagem do solo, condição fundamental para o manejo de precisão na irrigação.

2.3. Internet das Coisas (IoT) na Irrigação

A Internet das Coisas (IoT) aplicada à agricultura possibilita a transição de métodos tradicionais para a agricultura de precisão através de uma infraestrutura de rede dinâmica que integra os meios físico e digital, viabilizando a adoção de sistemas orientados a dados (*data-driven*) para a tomada de decisões visando prevenção e otimização de recursos naturais e econômicos (ABDELMONEIM et al., 2025). A estruturação básica para obtenção contínua de informações se concentra nas Redes de Sensores Sem Fio (WSN), que se destacam pela capacidade de auto-organização, autoconfiguração e escalabilidade em ambientes agrícolas. A arquitetura clássica dessas redes é composta por sensores de campo que coletam dados e os enviam, via radiofrequência, para gateways responsáveis pela conexão com a internet. No entanto, com os recentes avanços da IoT, a adoção de microcontroladores com comunicação Wi-Fi nativa permite que os próprios sensores atuem de forma independente, coletando os parâmetros agronômicos e transmitindo-os diretamente aos servidores na nuvem, simplificando a infraestrutura (QUY et al., 2022).

Como apresentado por Duguma e Bai (2024) a obtenção contínua de variáveis agronômicas, como a tensão da água no solo, umidade relativa, temperatura e a radiação solar, aliadas a sistemas de aprendizado de máquina e controle em nuvem,

permite o cálculo preciso das demandas hídricas da lavoura. Consequentemente, o manejo da irrigação deixa de depender de tecnologias tradicionais baseadas em temporizadores fixos, passando a adotar sistemas de circuito fechado. Esses sistemas automatizam o acionamento de válvulas e bombas apenas quando limites hídricos pré-estabelecidos são alcançados.(SANCHES et al., 2022). Esse controle automatizado e baseado em dados permite garantir o fornecimento hídrico exato, prevenindo déficit ou excesso de água, mitigando a lixiviação de nutrientes no solo, resultando na maximização da produtividade e redução no consumo de água e gastos com energia (DUGUMA; BAI, 2024).

A adoção de tecnologias de Internet das Coisas (IoT) na agricultura de precisão tem sido impulsionada por hardwares de baixo custo e desempenho eficiente. Nesse cenário, se destacam as placas de desenvolvimento baseadas no microcontrolador ESP32 (PEREIRA; CHAARI; DAROGE, 2023). A viabilidade da implantação de sensores em campo com essa tecnologia se deve à sua arquitetura integrada, que une capacidade de processamento local, eficiência energética e módulo de comunicação sem fio nativo via Wi-Fi (ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., 2025). A capacidade de processamento do microcontrolador viabiliza a adoção de algoritmos de pré-processamento de dados de forma embarcada (na própria placa). Além do ganho computacional, o dispositivo simplifica a montagem do hardware dispensando a integração de módulos de comunicação adicionais. Essa característica é essencial para a transmissão direta das leituras de campo para plataformas IoT na nuvem. Adicionalmente, a conectividade integrada permite a formação de redes em malha (mesh) capazes de ampliar a cobertura espacial da lavoura (GOMES et al., 2024; PARIDA et al., 2019; ZAFAR et al., 2018).

A arquitetura dos microcontroladores ESP32 conta com conversores analógico-digitais de alta resolução, fundamentais para traduzir com exatidão as variações de tensão em transdutores de pressão de tensiômetros automatizados, também disponibilizando interfaces múltiplas para a integração simultânea de diferentes sensores ambientais (ABDELMONEIM et al., 2023).

A escolha do protocolo de comunicação no ambiente agrícola é outra variável importante e que exige integração de diferentes tecnologias, contrapondo frequentemente o protocolo LoRa (*Long Range*) ou Wi-Fi. Embora o LoRa apresente a vantagem do longo alcance e do consumo energético extremamente baixo, sua reduzida taxa de transferência restringe o envio a pacotes mínimos de dados, inviabilizando aplicações que demandam de alta capacidade (TOVAR-SOTO et al., 2021). Em contrapartida, o Wi-Fi, operando na frequência global de 2,4 GHz, proporciona uma largura de banda ampla para tráfego rápido de volumes maiores de informações e facilita a conexão direta na internet sem necessidade de *gateway* proprietário. Contudo, o uso convencional dessa tecnologia no campo é limitada no raio de alcance e demandando mais energia quando comparado ao LoRa (DING; CHANDRA, 2019).

Para superar o raio de alcance do Wi-Fi em áreas agrícolas, a implantação de Redes em Malha conectadas a microcontroladores como o ESP32 surge como uma solução. Nesse formato, os próprios microcontroladores distribuídos pela lavoura atuam como roteadores dinâmicos, propagando o sinal em saltos múltiplos e contínuos até alcançarem o nó central. Dessa forma, desde que a alimentação com energia se mantenha constante, a adoção de uma arquitetura de transmissão exclusivamente por Wi-Fi supera o LoRa ao entregar uma rede escalável e de baixo custo. Essa estratégia garante o fluxo de dados em contínuo, junto de alta capacidade

de banda e integração nativa com plataformas em nuvem, características essenciais para a conectividade exigida pela agricultura de precisão (DING; CHANDRA, 2019; GOMES et al., 2024).

A etapa final da estruturação IoT aplicada à agricultura corresponde a transmissão e a visualização dos dados, processo fundamental para converter medições brutas em tomadas de decisão de manejo. Para garantir que as informações coletadas pelos microcontroladores alcancem a nuvem de forma rápida e segura, a adoção de métodos de comunicação otimizados é fundamental. Nesse contexto, o protocolo MQTT se sobressai pela sua arquitetura leve, operando com baixa latência e com elevada eficiência energética. Protocolos tradicionais como o HTTP, em redes restritas, são superados em termos de eficiência, assegurando a troca ininterrupta a integridade do fluxo de dados (NSOH et al., 2024).

Após a recepção na nuvem, plataformas web de IoT, como o ThingSpeak e AWS IoT Hub, assumem a estruturação e processamento analítico das informações, frequentemente formatadas no formato JSON e atreladas em marcadores temporais (*timestamps*) para garantir um registro histórico exato do banco de dados (ZAFAR et al., 2018). Essas interfaces geram dashboards e gráficos, possibilitando o acompanhamento remoto e detalhado da lavoura. Além da visualização ininterrupta, esse armazenamento e processamento preditivo viabilizam a automação baseada em regras, em que ao identificar que os parâmetros observados atingiram limites pré-determinados, a plataforma pode acionar de forma autônoma atuadores e válvulas de irrigação, consolidando a otimização da água, minimizando a dependência de mão de obra in loco maximizando a produtividade das safras a longo prazo (PARIDA et al., 2019).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado no laboratório de recursos hídricos do Departamento de Engenharia da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Unesp, Câmpus de Jaboticabal, SP (21°14’50” S; 48°17’05” W e altitude de 570 m).

A arquitetura do sistema eletrônico foi estruturada a partir de uma placa de desenvolvimento da fabricante DOIT, baseada no módulo ESP32-WROOM-32D, ilustrado pela Figura 1. Este componente é fundamentado no microcontrolador ESP32 (baseado na arquitetura MCU Tensilica Xtensa Dual-Core de 32 bits), operando com 520 KB de memória SRAM interna e memória flash de 4MB para armazenamento do *firmware*. Fisicamente, a placa utilizada apresenta 30 pinos de expansão (headers) para interface com os periféricos e um conector padrão USB-C, utilizado tanto para alimentação elétrica quanto para comunicação serial e gravação de códigos. A escolha desse hardware se justifica pela capacidade de processamento e conectividade nativa com redes Wi-Fi.

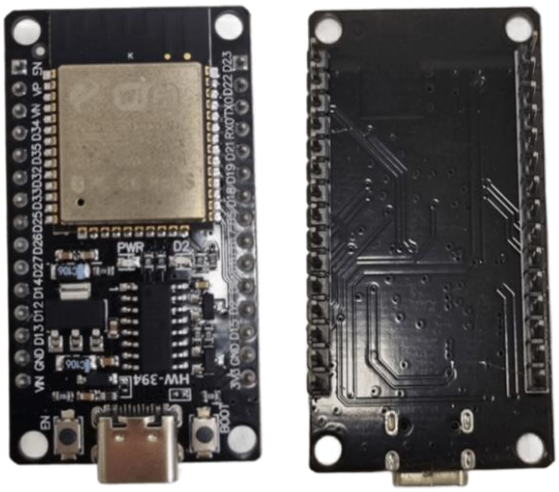


Figura 1. Placa ESP32 Devkit V1

Visando garantir o suporte físico adequado ao módulo ESP32, assim como a segurança e estabilidade das conexões elétricas, empregou-se uma placa de

extensão (*breakout board*) equipada com terminais em bornes, representada pela Figura 2. Se trata de um componente responsável por permitir fixar mecanicamente os cabos de interligação por meio de parafusos. Essa estratégia permitiu mitigar significativamente riscos de falhas por mau contato elétrico, conferindo modularidade ao sistema e facilitando eventuais manutenções preventivas ou de substituição de componentes.

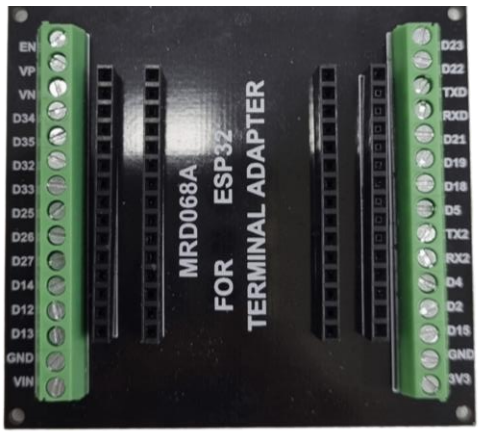


Figura 2. Placa extensora para ESP32 de 30 pinos.

O sistema de aquisição de dados foi estruturado acoplando-se dois sensores de pressão diferencial MPX5100DP à unidade microcontroladora (Figura 3). Estes componentes são responsáveis por aferir e quantificar a pressão negativa gerada no interior do tensiômetro, refletindo diretamente a tensão de água no solo. Internamente, os dispositivos são compostos por um elemento sensor de silício monolítico, que converte essa pressão em sinais elétricos analógicos proporcionais. A escolha deste modelo justifica-se pela sua alta precisão, apresentando um erro máximo de apenas 2,5% na faixa de temperatura compensada de 0 a 85°C (NXP SEMICONDUCTORS, 2018). Após a digitalização dos sinais analógicos, o microcontrolador realizava o processamento das informações e as transmitia diretamente, via rede Wi-Fi, para a plataforma digital ThingSpeak.

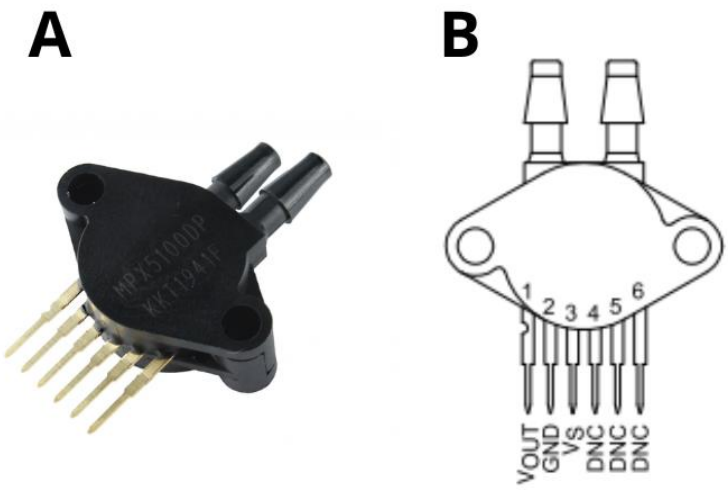


Figura 3. Sensor MPX5100DP: (A) Foto do sensor; (B) Diagrama dos pinos do sensor.

Acrescentaram-se ao sistema elétrico dois divisores de tensão, mecanismos necessários para adequar os níveis de tensão elétrica entre dispositivos com diferentes tensões de operação. Essa adequação foi necessária pois o sensor MPX5100DP opera com a tensão elétrica na faixa de 5 V, enquanto o microcontrolador possui portas de leitura analógica tolerantes a 3,3 V. Para a correta definição dos valores nominais dos resistores a serem empregados, utilizou-se o conceito fundamentado por Boylestad (2018). Este teorema define que a tensão de saída de um divisor resistivo é obtida pela relação entre a resistência inferior e a resistência total do circuito, relação expressa matematicamente pela Equação 1.

$$Vout = Vin \times \frac{R2}{R1+R2} \quad (1)$$

Em que:

V_{out} - tensão elétrica que sai do divisor de tensão, a qual é direcionada à porta analógica do microcontrolador, projetada para um limite seguro de 3,3 V;

V_{in} - tensão elétrica de entrada proveniente do sinal analógico do sensor MPX5100DP, com pico de operação em 5 V;

R_1 - resistência do resistor superior do circuito, conectado em série com o sensor; e

R_2 - resistência do resistor inferior, conectado em paralelo ao aterramento comum (GND) do sistema.

Considerando que o sinal máximo de saída do sensor MPX5100DP (V_{out}) atinge 5 V e o limite de segurança operacional do conversor analógico-digital do ESP32 (V_{in}) é de 3,3 V, aplicou-se a Equação 1 para dimensionamento prático do circuito. Para atender a proporção das resistências obtidas, adotaram-se valores comerciais de resistores, sendo a resistência superior (R_1) em 1,8 kΩ e a resistência inferior (R_2) em 3,3 kΩ. Essa configuração estabeleceu uma queda de tensão segura, garantindo a integridade física do microcontrolador sem comprometer a qualidade das leituras analógicas.

Com o objetivo de reduzir interferências elétricas nas leituras do microcontrolador, foram incorporados filtros RC (Resistor-Capacitor), apresentado na Figura 4, soldados diretamente nas saídas dos sensores, compostos por um resistor de 1 kΩ e um capacitor de 100 nF. O filtro RC atua como um filtro passa-baixa, atenuando componentes espectrais de alta frequência do sinal enquanto preserva variações lentas de interesse, correspondendo no contexto da Tensiometria ao sinal de pressão que varia na escala de minutos a horas, representando frequências muito inferiores ao limite de corte. Os valores dos componentes foram selecionados buscando resultar em uma frequência de corte próxima de 1,6 kHz, acima da faixa de variação do sinal útil para não interferir na medição.

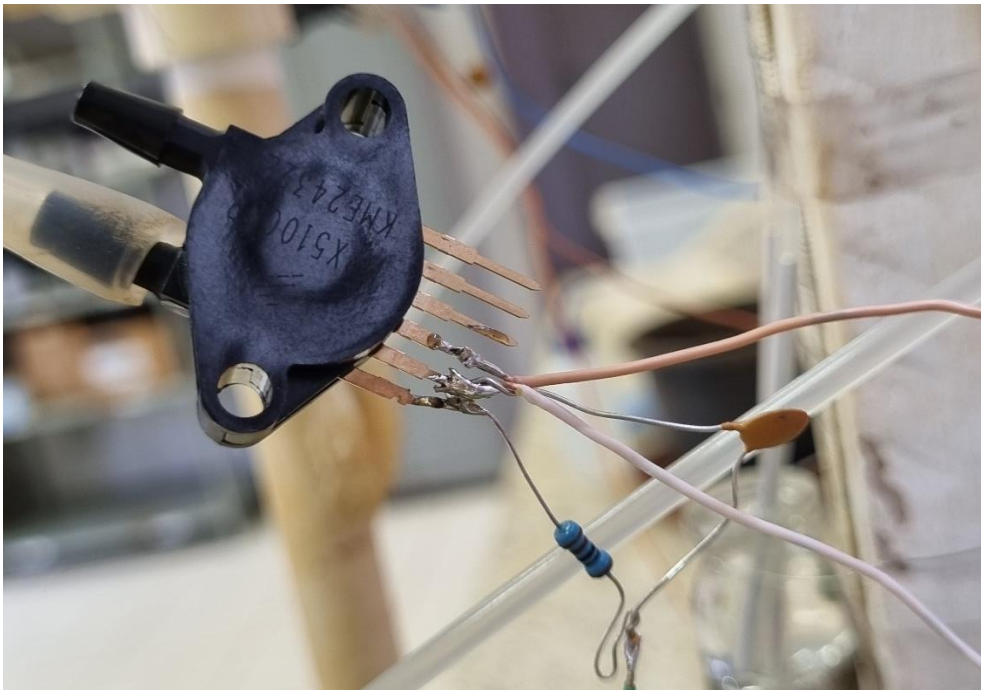


Figura 4. Filtro Resistor-Capacitor soldado ao sensor MPX5100DP.

A programação do microcontrolador foi desenvolvida em linguagem C++, utilizando o ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) do software Arduino. A interface física entre o computador e as placas para a compilação e carregamento do *firmware* foi estabelecida via porta USB. Para garantir a compatibilidade do *hardware*, o pacote ‘esp32 by Espressif Systems’ foi previamente instalado no ambiente de desenvolvimento. A conectividade do dispositivo na rede local Wi-Fi foi gerenciada pela dependência WiFi.h, que operou integrada à biblioteca ThingSpeak.h, responsável por estruturar o envio contínuo de dados para a nuvem. Para o monitoramento in loco das leituras, o projeto adotou um display LCD 16x2 conectado via barramento I2C. A comunicação do hardware e a geração textual desse periférico foram organizados pelas bibliotecas Wire.h e LiquidCrystal_I2C.h, garantindo que houvesse a visualização dos parâmetros no próprio instrumento.

A calibração dos sensores foi realizada por comparação direta com um instrumento de referência, utilizando uma coluna de mercúrio submetida à pressão

negativa controlada. As leituras dos sensores MPX5100DP foram registradas no formato analógico das entradas do microcontrolador, sendo valores inteiros de 0 a 4095, correspondentes à conversão analógico-digital (ADC) de 12 bits, coletados simultaneamente às da coluna, cobrindo a faixa de 0 a 85 kPa com 13 pontos distribuídos ao longo da tensão de trabalho efetiva do tensiômetro, demonstrado na Figuras 5 e 6. Ressalta-se que, embora o ADC do ESP32 apresente uma resposta característica não linear, esse efeito foi compensado empiricamente pelo próprio procedimento de calibração, uma vez que a curva ajustada correlacionou de forma direta os valores digitais brutos obtidos com o instrumento de referência.



Figura 5.Calibração dos sensores através da comparação direta com coluna de mercúrio.



Figura 6. Dispositivo construído para aplicação de vácuo durante a calibração.

A partir dos pares de valores obtidos, realizou-se o ajuste com uma curva de calibração por meio de regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários, possibilitando a obtenção dos coeficientes angular e linear de cada sensor. A qualidade do ajuste foi avaliada pelo coeficiente de determinação, com R^2 = 0,999 para ambos os sensores, indicando elevada linearidade na faixa de medição. Os coeficientes obtidos foram incorporados à Equação 2, derivada da equação de transferência do fabricante do MPX5100DP, demonstrada na Equação 3, permitindo a conversão direta das leituras brutas em kPa no firmware do sistema.

$$P = (ADC - b)/m \tag{2}$$

Em que:

P – Pressão expressa em kPa;

ADC – Valor digital bruto registrado pelo conversor analógico-digital do ESP32 (número inteiro variando de 0 a 4095);

b – Coeficiente linear da reta de calibração (intercepto, que representa a leitura do ADC quando a pressão é nula);

m – Coeficiente angular da reta de calibração (inclinação, que define a taxa de variação da leitura do ADC para cada unidade de pressão aplicada).

$$V_{OUT} = V_S \times (0{,}009 \times P + 0{,}04) \quad (3)$$

Em que:

V_{out} – Tensão analógica de saída do sensor (V);

V_s – Tensão elétrica de alimentação do sensor (V);

P – Pressão diferencial lida pelo sensor (kPa);

0,009 e 0,04 – Constantes adimensionais fornecidas pelo fabricante, definindo a sensibilidade e o erro do offset do componente, respectivamente.

Para comportar os dois sensores foram construídos dois tensiômetros utilizando tubos de PVC rígido de 1/2”, com diâmetros internos e externos de 0,016 e 0,021 m, respectivamente. Na extremidade inferior foi fixada uma cápsula porosa de cerâmica e, na extremidade superior, uma rolha de borracha coberta por um cap de PVC para aplicação de vácuo no dispositivo. A montagem final da estrutura pode ser observada na Figura 7.

O sensor MPX5100DP foi acoplado por meio de uma conexão em T de PVC encaixada na porção superior do tubo. O manômetro de mercúrio foi fixado ao tubo por meio de uma perfuração vedada com adesivo epóxi bicomponente. Antes do uso, o sistema foi saturado com água deionizada mediante preenchimento completo do interior do tubo e eliminação do ar, seguida da vedação com a rolha e cap.



Figura 7. Tensiômetro utilizado.

Os tensiômetros foram instalados em um vaso de 30 litros preenchido com substrato composto por 40% de solo argiloso (~40% de argila), 25% de areia e 35% de terra vegetal. O tensiômetro 1 foi enterrado a 10 cm de profundidade e o tensiômetro 2 a 15 cm. O solo foi umedecido até a saturação e mantido em ambiente controlado e coberto para acompanhamento do processo de secagem. A figura 8 demonstra a instalação final dos tensiômetros no vaso.

A coleta de dados de potencial mátrico foi realizada ao longo de 20 dias, com duas leituras diárias, entre 7h e 9h e entre 17h e 19h, compreendendo leituras presenciais dos manômetros de mercúrio e registro simultâneo das leituras dos sensores eletrônicos na plataforma ThingSpeak.

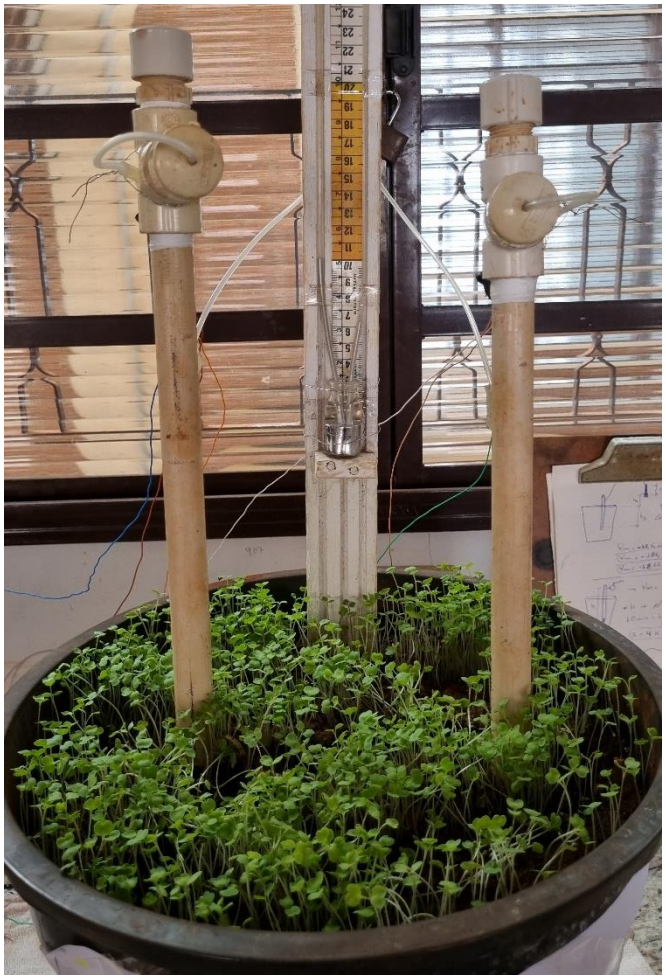


Figura 8. Tensiômetros instalados em vaso.

Os dados exibidos nos manômetros de mercúrio foram obtidos medindo-se a elevação da coluna de mercúrio, em cmH_2O, e calculando-se o potencial mátrico da água no solo através da equação 4.

$$\psi_m = -12{,}6h_{Hg} + h_c + z \quad (4)$$

Em que "h_{Hg}" é a altura da coluna de mercúrio; "h_c" a altura do nível de mercúrio na base da cubeta em relação a superfície do solo; e "z" a distância entre o centro da cápsula de cerâmica e a superfície do solo, todas mensuradas em cmH_2O, convertidas para kPa posteriormente utilizando o fator de conversão de 10,197 (1 cmH_2O = 0,0980665 kPa).

Para a interpretação das leituras do sensor eletrônico considerou-se a equação 5, incorporada diretamente no código final do microcontrolador.

$$\psi_m = -L + h \quad (5)$$

Em que L é a leitura obtida feita pelo sensor e processada pelo microcontrolador; e h sendo a altura do sensor até o centro da cápsula de cerâmica.

A plataforma ThingSpeak é um serviço de IoT que permite armazenamento e visualização remota e contínua de dados por meio de qualquer dispositivo conectado à internet. O microcontrolador foi programado para realizar o envio em intervalos regulares de 30 minutos, registrando-os em um canal dedicado ao projeto no qual cada variável monitorada é armazenada em um campo individual. Para facilitar o acompanhamento, foram configurados um gráfico de linha e um painel de visualização para cada tensiômetro.

Ao encerrar o período de coleta, os dados obtidos pelos sensores eletrônicos e pelos manômetros de mercúrio foram analisados separadamente para cada tensiômetro, considerando as profundidades de 10 e 15 cm de forma independente. A relação funcional entre os dois métodos de medição foi avaliada por regressão linear com o coeficiente de determinação (R^2), verificando o grau de ajuste entre as leituras. A força da associação linear foi quantificada pelo coeficiente de correlação de Pearson (r). A concordância entre métodos foi avaliada pelo método de Bland-Altman, que permite identificar vieses sistemáticos e os limites de concordância entre dois instrumentos de medição (BLAND; ALTMAN, 1999). Adicionalmente, para quantificar a magnitude dos desvios e avaliar a exatidão do sistema eletrônico em relação ao padrão, calcularam-se a Raíz do Erro Quadrático Médio (RMSE) e o Erro Absoluto Médio (MAE). Por fim, o teste t pareado foi aplicado para verificar se as diferenças

médias entre as leituras eletrônicas e as dos manômetros de mercúrio são estatisticamente significativas, adotando-se nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de experimentação, as leituras de tensão matricial variaram entre 5 e 50 kPa, intervalo que abrange desde a condição de capacidade de campo até o início de estresse hídrico para uma grande variedade de culturas agrícolas de interesse comercial (MAROUELLI, 2008).

Para avaliação da exatidão e magnitude dos desvios operacionais dos manômetros eletrônicos em relação ao método padrão da coluna de mercúrio, foram calculados os índices de erro RMSE (Raíz do Erro Quadrático Médio) e MAE (Erro Absoluto Médio). Os erros obtidos para ambos os instrumentos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Índices de erro RMSE e MAE obtidos na avaliação dos tensiômetros automatizados.

	Tensiômetro 1	Tensiômetro 2
RMSE (kPa)	0,6307	0,6320
MAE (kPa)	0,5617	0,5360

Os resultados demonstram que ambos os tensiômetros apresentaram um comportamento homogêneo e de alta precisão. A margem estreita observada entre os valores de RMSE e MAE evidencia a ausência de falhas pontuais discrepantes, atestando que os desvios de leitura são estáveis e homogêneos em toda a escala de medição avaliada. Do ponto de vista agronômico e de aplicação prática, variações entre 0,5 e 0,6 kPa são irrisórias para a tomada de decisão no campo.

Além de apresentarem desvios reduzidos, se tornou necessário avaliar se as leituras dos sensores mantêm uma proporcionalidade constante com o padrão analógico. Portanto, para validar a linearidade das medições eletrônicas em relação ao método de referência (manômetro de mercúrio), aplicou-se a análise de regressão linear simples aos dados obtidos pelos sensores MPX5100DP. Os parâmetros resultantes para ambos os tensiômetros estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Regressão Linear para os dois tensiômetros construídos

	Tensiômetro 1	Tensiômetro 2
Coeficiente Angular (b)	0,9947	1,0051
Intercepto (a)	0,4931	0,3503
R^2	0,9987	0,9986
r Pearson ($\sqrt{R^2}$)	0,999	0,999

As análises de regressão linear entre os valores de potencial mátrico fixados na coluna de mercúrio e os valores lidos pelos sensores eletrônicos revelaram elevado grau de ajuste para ambos os tensiômetros avaliados. O Tensiômetro 1 apresentou coeficiente de determinação (R^2) de 0,9987, enquanto o Tensiômetro 2 apresentou R^2 de 0,9986. O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi de 0,999 para ambos.

Os coeficientes angulares das equações de regressão apresentaram uma reprodução de magnitude das variações de potencial mátrico de forma equivalente ao método de referência (1:1). Os interceptos próximos de zero indicaram que os sensores eletrônicos reproduzem tanto a tendência quanto a magnitude das leituras

de referência. As Figuras 9 e 10 representam graficamente a regressão linear para ambos os Tensiômetros 1 e 2 respectivamente.

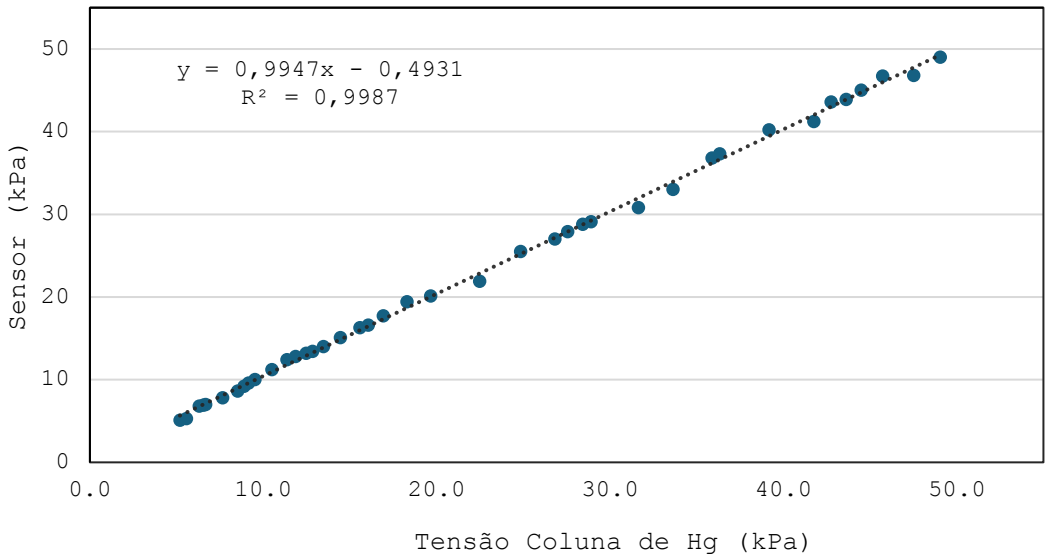


Figura 9. Relação entre o potencial mátrico da coluna de mercúrio com o sensor eletrônico do Tensiômetro 1.

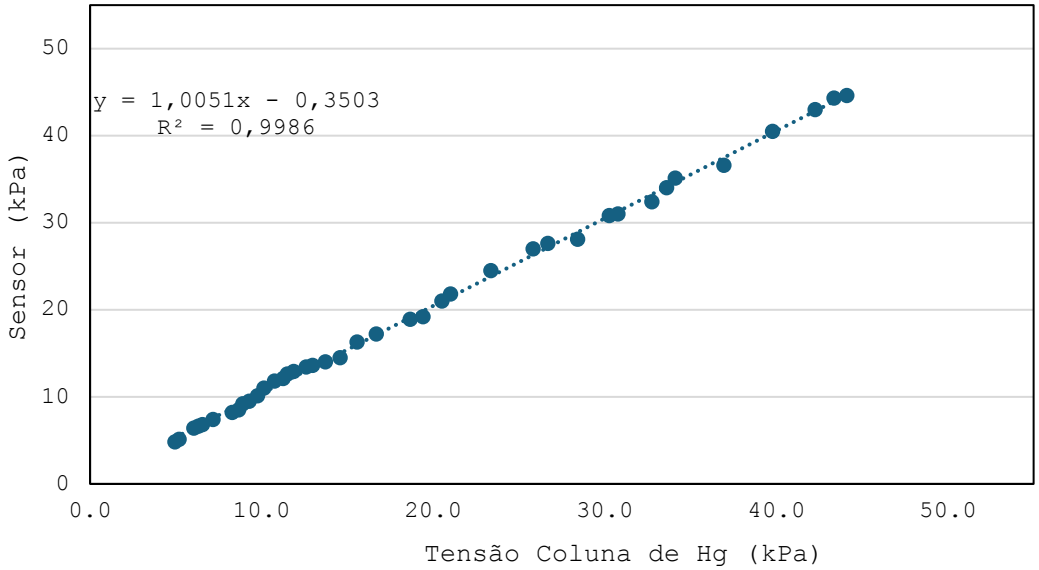


Figura 10. Relação entre o potencial mátrico da coluna de mercúrio com o sensor eletrônico do Tensiômetro 2.

Resultados semelhantes foram obtidos por Abdelmoneim et al. (2023), que desenvolveram um tensiômetro eletrônico baseado em microcontrolador ESP32 e sensor barométrico BMP180, validado em laboratório comparado com o mesmo tensiômetro equipado com um manômetro mecânico, obtendo R^2 de 0,99 para tensões de até 80 kPa. A similaridade entre os valores de R^2 obtidos, apesar das diferenças no sensor utilizado e faixa de tensão avaliada, reforça a robustez de associar microcontroladores ESP32 e sensores de pressão eletrônicos como alternativa viável à tensiometria convencional baseada em manômetros analógicos.

Cabe destacar, contudo, que o estudo de Abdelmoneim et al. (2023) se limitou à análise de regressão linear como critério único de validação, não tendo sido empregadas análises de concordância absoluta (Bland-Altman) ou testes de comparação de médias, restringindo a avaliação da magnitude real das diferenças entre os métodos. O presente trabalho avança nesse aspecto, associando a análise de regressão a métodos de validação complementares.

Um desses métodos complementares é a análise de concordância proposta por Bland e Altman (1999), amplamente utilizada para a validação de instrumentos de medição em diferentes áreas do conhecimento. Sua relevância decorre do fato de que a regressão linear sozinha avalia apenas a relação proporcional entre métodos, insensível a presença de viés sistemático constante, com dois métodos podendo apresentar coeficiente de determinação próximo da unidade e, ainda assim, divergirem em magnitude consistentemente, situação que o R^2 não consegue evidenciar. A análise de Bland-Altman supre essa limitação ao quantificar diretamente

a diferença entre métodos em função da magnitude medida, a expressando através do viés médio e dos limites de concordância (LoA).

As análises de Bland-Altman apresentadas nas Figuras 11 e 12 revelaram viés sistemático de 0,37 kPa para o Tensiômetro 1 e de 0,45 kPa para o Tensiômetro 2. Os limites de concordância (LoA) variaram de -0,63 a +1,38 kPa para T1 e -0,43 a 1,33 kPa para T2, caracterizando uma amplitude de discordância inferior a 2,1 kPa em ambos os casos. As Figuras 11 e 12 representam graficamente o teste de concordância para os Tensiômetros 1 e 2, respectivamente.

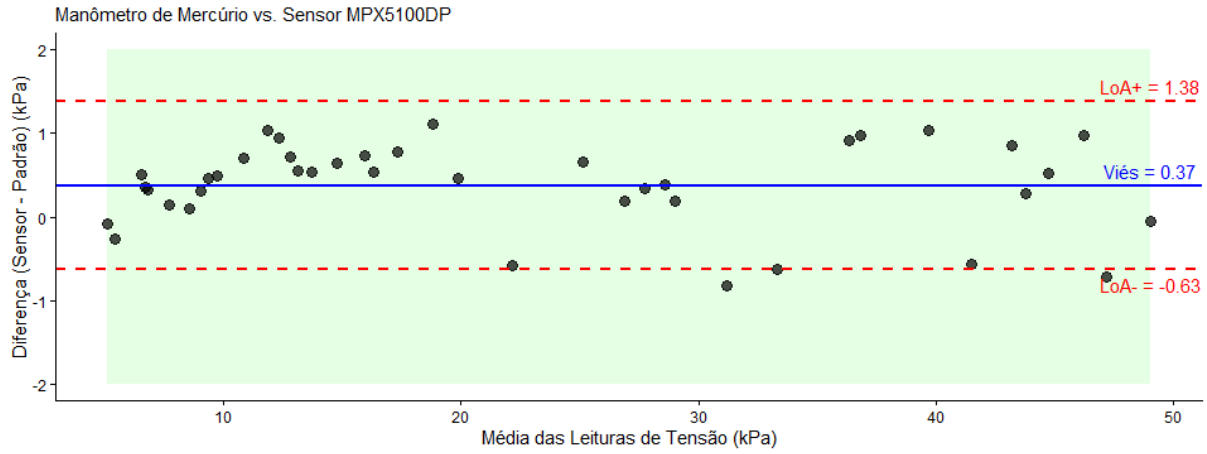


Figura 11. Análise de Concordância de Bland-Altman para o Tensiômetro 1.

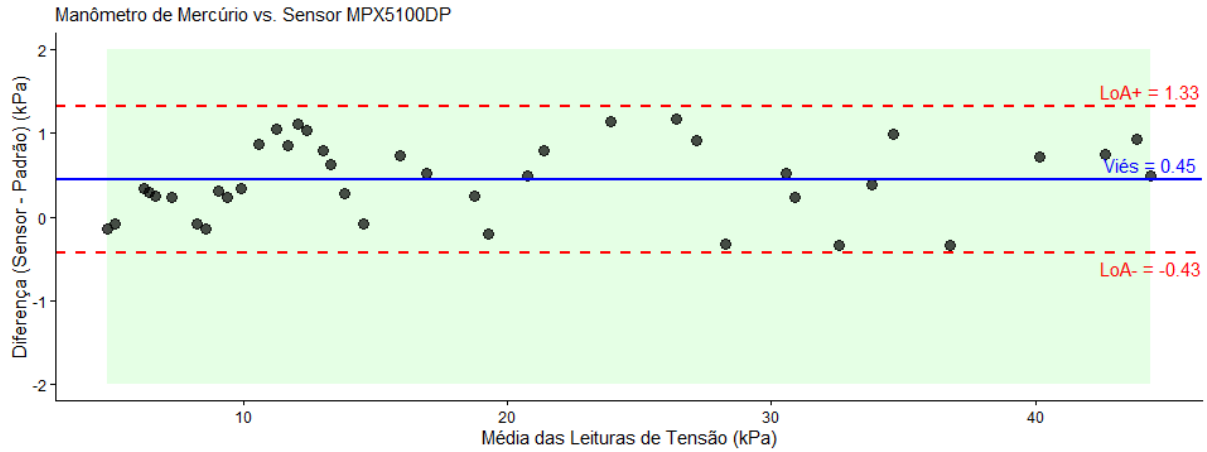


Figura 12. Análise de Concordância de Bland-Altman para o Tensiômetro 2.

A distribuição dos pontos ao longo do eixo das médias (eixo x) não evidenciou tendência sistemática de aumento ou diminuição da diferença em função da magnitude da tensão, sugerindo que o erro entre os métodos se mantém relativamente constante dentro da faixa avaliada (aproximadamente 5 a 50 kPa), característica desejável para instrumentos de medição e confirmada pela proximidade entre os valores de RMSE e MAE apresentados anteriormente.

Os resultados da análise de Bland-Altman evidenciaram que, embora exista um viés sistemático mensurável, sua magnitude é reduzida em ambos os tensiômetros avaliados. Os valores de viés (0,37 kPa para T1 e 0,45 para T2) indicam uma leve tendência de superestimação das leituras eletrônicas em relação ao manômetro de mercúrio.

Os limites de concordância (LoA) obtidos (-0,63 a 1,38 kPa para T1 e -0,43 a 1,33 kPa para T2) configuram uma amplitude de discordância inferior a 2,1 kPa em ambos os casos. Em termos práticos, os limites de concordância indicam que, para o Tensiômetro 1, em 95% das medições, o sensor eletrônico pode superestimar a leitura do manômetro de mercúrio em até 1,38 kPa ou subestimá-la em até 0,63 kPa. Para o Tensiômetro 2, essa variação corresponde a uma superestimativa de até 1,33 kPa ou subestimativa de até 0,43 kPa, também em 95% das medições.

A ausência de estudos correlatos que tenham empregado a análise de Bland-Altman na validação de tensiômetros eletrônicos baseados em microcontroladores limita a possibilidade de comparação direta desses valores com a literatura.

Complementarmente à análise de Bland-Altman, o teste t pareado foi empregado para verificar a existência de diferença estatisticamente significativa entre

as médias das leituras dos dois métodos, permitindo quantificar se o viés sistemático identificado é estatisticamente distinguível de zero.

O teste t pareado apresentou para o Tensiômetro 1 $t(39) = 4{,}617$ e $p < 0{,}001$, com diferença média de 0,37 kPa (IC 95%: 0,21 a 0,54 kPa). Para o Tensiômetro 2, obteve-se $t(39) = 6{,}309$ e $p < 0{,}001$, com diferença média de 0,45 kPa (IC 95%: 0,31 a 0,59 kPa), revelando diferença estatisticamente significativa entre as leituras dos sensores eletrônicos e do manômetro de mercúrio para ambos os tensiômetros.

Embora o teste t tenha indicado diferença estatisticamente significativa entre os métodos, é importante distinguir significância estatística de relevância prática. As diferenças médias encontradas (0,37 kPa para T1 e 0,45kPa para T2) são numericamente reduzidas quando comparadas à escala de tensão relevante para o manejo da irrigação. Considerando que as decisões de irrigação são geralmente baseadas em variações de potencial mátrico da ordem de dezenas de kPa (PEREIRA et al., 2020; PEREIRA et al., 2022), um erro médio inferior a 0,5 kPa representa impacto desprezível sobre a tomada de decisão no campo.

Esse resultado é coerente com os limites de concordância obtidos anteriormente pela análise de Bland-Altman, reforçando que, mesmo com viés sistemático mensurável, a amplitude da discordância entre os métodos permanece dentro de uma faixa aceitável para integração a irrigação. A análise conjunta dos testes apresentados anteriormente permite, portanto, uma avaliação mais completa do desempenho do sensor do que cada abordagem isolada seria capaz de oferecer.

Bland e Altman (1999) argumentam que o teste de significância avalia apenas se existe diferença entre os métodos, o que é praticamente garantido quando dois instrumentos são projetados para mensurar a mesma grandeza física, especialmente com amostras de tamanho suficiente. Por essa razão, esse teste é considerado

inadequado para avaliar a concordância de forma isolada. Para ilustrar o argumento, os autores apresentam um exemplo de oximetria de pulso, em que um viés pequeno e estatisticamente significativo (0,42 pontos percentuais, IC95% 0,13 – 0,70) pode coexistir com limites de concordância suficientemente estreitos para validar o uso intercambiável dos métodos. De forma semelhante, o presente estudo obteve um teste t pareado que indicou significância estatística, mas a magnitude do viés (0,37 kPa para T1 e 0,45 kPa para T2) e os limites de concordância (-0,63 a 1,38 kPa para T1 e -0,43 a 1,33 kPa para T2) demonstram que essa diferença sistemática é pequena o suficiente para não comprometer a validade prática do sensor.

As análises estatísticas empregadas indicam, de forma convergente, que os tensiômetros desenvolvidos apresentam desempenho equivalente ao manômetro de mercúrio para fins práticos de monitoramento da tensão de água no solo. O elevado grau de ajuste evidenciado pela regressão linear, aliado ao viés reduzido e limites de concordância estreitos identificados na análise de Bland-Altman, e aos erros médios inferiores a 0,65 kPa verificados pelo RMSE e MAE, demonstram que as diferenças entre métodos, embora estatisticamente mensuráveis, não comprometem a validade prática do sistema desenvolvido. O pequeno viés sistemático identificado, caso necessário pode ser corrigido pelos coeficientes de calibração já determinados pela regressão linear, possibilitando flexibilidade para ajustes futuros.

Cabe ressaltar que a calibração dos sensores e a posterior validação foram conduzidas tendo a coluna de mercúrio como referência comum. Assim, parte da elevada concordância observada decorre do próprio procedimento de ajuste, e o desempenho relatado deve ser interpretado como uma validação frente ao padrão adotado, e não como uma verificação totalmente independente. Estudos futuros

poderão empregar um segundo método de referência ou dados de campo com balanço hídrico para uma validação independente.

Complementarmente aos resultados estatísticos, o sistema demonstrou pleno funcionamento quanto à transmissão e visualização contínua de dados.

O sistema desenvolvido realizou a transmissão automática dos dados de potencial mátrico para a plataforma de Internet das Coisas ThingSpeak, por meio de conexão WiFi do microcontrolador. A Figura 13 apresenta o painel de visualização (dashboard) da plataforma, no qual são exibidas as leituras dos dois tensiômetros, atualizados a cada 30 minutos.

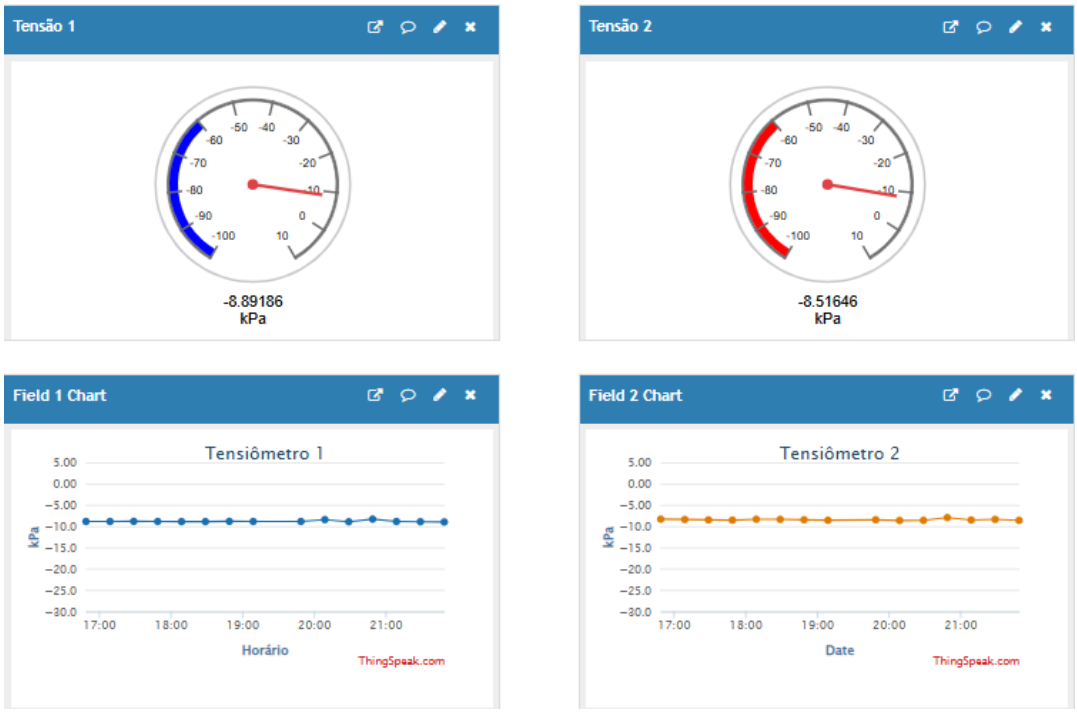


Figura 13. Painel de monitoramento das leituras de potencial mátrico dos tensiômetros eletrônicos na plataforma ThingSpeak.

Ainda que satisfatórios os resultados obtidos, algumas limitações experimentais merecem ser consideradas na interpretação dos dados amostrados.

A aplicabilidade prática da tensiometria eletrônica em sistemas de automação da irrigação já foi demonstrada por Pereira et al. (2020) e Pereira, Sandri e Rios (2022), que utilizaram tensiômetros eletrônicos integrados a plataforma Arduino para o manejo automatizado da irrigação em diferentes tipos de solo e em diferentes potenciais mátricos críticos, na faixa de 10 a 35 kPa. Embora esses estudos tenham priorizado a avaliação de desempenho do sistema de automação em si, e não a validação estatística do sensor frente a um método de referência, os resultados reforçam que a faixa de tensão observada no presente trabalho, situada entre 5 a 50 kPa, abrange valores de relevância prática para o manejo da irrigação de diversas culturas. Ainda assim, é importante reconhecer que essa faixa foi inferior à inicialmente almejada (próxima de 80 kPa).

Outra limitação relevante refere-se ao fato de que a validação dos tensiômetros foi conduzida em condições controladas, em ambiente de vaso e sob monitoramento direto, o que difere de condições de campo enfrentadas no manejo de campo real. Dessa forma, os resultados aqui obtidos devem ser interpretados como uma validação inicial do princípio de funcionamento e da acurácia do sistema.

5. CONCLUSÕES

O protótipo do tensiômetro eletrônico demonstrou viabilidade técnica para o monitoramento contínuo do potencial mátrico do solo. A calibração do sensor MPX5100DP garantiu alta precisão estatística, entregando resultados concordantes com os do tensiômetro de mercúrio tradicional. Além disso, a integração com o microcontrolador ESP32 e a transmissão via Wi-Fi para a plataforma ThingSpeak operaram com sucesso, eliminando a necessidade de leituras manuais e viabilizando o equipamento como ferramenta confiável para o monitoramento da tensão da água no solo. Com base na literatura, recomenda-se como próximo passo a validação do sistema em condições reais de campo.

6. REFERÊNCIAS

ABDELMONEIM, Ahmed Ali; KHADRA, Roula; DERARDJA, Bilal; DRAGONETTI, Giovanna. Internet of Things (IoT) for Soil Moisture Tensiometer Automation. **Micromachines**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 263, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/mi14020263.

ABDELMONEIM, Ahmed A.; KIMAITA, Hilda N.; KALAANY, Christa M. Al; DERARDJA, Bilal; DRAGONETTI, Giovanna; KHADRA, Roula. IoT Sensing for Advanced Irrigation Management: A Systematic Review of Trends, Challenges, and Future Prospects. **Sensors**, [s. l.], v. 25, n. 7, p. 2291, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s25072291.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). **Atlas irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. 2. ed. Brasília, DF: ANA, 2021.

ALMEIDA, Ana Paula; ARAÚJO, Fernando Silva; SOUZA, Gustavo Soares de. Determinação da curva parcial de retenção de água de um Latossolo Vermelho por tensiometria. **Scientia Plena**, [s. l.], v. 6, 2010.

BERALDO, José M. G.; CORA, José E.; FERNANDES, Edemo J. Measurement systems of soil water matric potential and evaluation of soil moisture under different irrigation depths. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 467-478, maio 2012. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000300006.

BIANCHI, Leandro; GERMINO, Gabriel Henrique; SILVA, Marcelo de Almeida. Adaptação das plantas ao déficit hídrico. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 5, n. 4, p. 15–32, 2016. Disponível em: https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v5i4.16006.

BLAND, John Martin; ALTMAN, Douglas G. Measuring agreement in method comparison studies. **Statistical Methods in Medical Research**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 135–160, 1999. Disponível em: https://doi.org/10.1177/096228029900800204 .

BOYLESTAD, Robert L. Circuitos de corrente contínua em paralelo. *In*: _____. **Introdução à análise de circuitos**. 13. ed. São Paulo: Pearson, 2018. cap. 5, p. 147-208.

BRITO, Alexsandro dos Santos; LIBARDI, Paulo Leonel; MOTA, Jaedson Cláudio Anunciato; MORAES, Sergio Oliveira. Desempenho do tensiômetro com diferentes sistemas de leitura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 33, n. 1, p. 17-24, jan. 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100002.

CANTELLE, Tatiana Dias; LIMA, Eudes de Castro; BORGES, Luís Antônio Coimbra. Panorama dos recursos hídricos no mundo e no Brasil. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, Maringá, v. 11, n. 4, p. 1259–1282, out./dez. 2018. Disponível em: https://doi.org/10.17765/2176-9168.2018v11n4p1259-1282.

CHRISTOFIDIS, Demetrios. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista de Política Agrícola**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 115–127, 2013.

COELHO, E. F.; MAROUELLI, Waldir Aparecido; SOUSA, V. F.; PINTO, J. M. Manejo da água de irrigação. *In*: MAROUELLI, Waldir Aparecido; OLIVEIRA, Áureo Silva de; COELHO, Eugênio Ferreira; NOGUEIRA, Luis Carlos; SOUSA, Valdemício Ferreira de. **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa, 2011. p. 157–232.

COELHO, Silvana de L.; TEIXEIRA, Adunias dos Santos. Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo. **Engenharia Agrícola**, [s. l.], v. 24, n. 3, p. 536–545, set. 2004.

CORAUCCI, Guilherme de Oliveira. **Sensor de pressão microeletrônico baseado no efeito piezoresistivo transversal em silício**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, Brasil, 2008.

DING, Jian; CHANDRA, Ranveer. Towards low cost soil sensing using Wi-Fi. *In*: ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING, 25., 2019, Los Cabos. **Proceedings** [...]. New York: Association for Computing Machinery, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1145/3300061.3345440.

DUGUMA, Amenu Leta; BAI, Xiuguang. How the Internet of Things technology improves agricultural efficiency. **Artificial Intelligence Review**, [s. l.], v. 58, art. 63, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s10462-024-11046-0.

DURIGON, Angelica. **Mecanismos de transferência de água entre solo, planta e atmosfera e sua relação com o estresse hídrico vegetal**. 2011. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011. Disponível em: https://doi.org/10.11606/T.11.2011.tde-20102011-101032

ESPRESSIF SYSTEMS (SHANGHAI) CO., LTD. **ESP32 series datasheet**: 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth + Bluetooth LE SoC. Versão 5.2. Shanghai: Espressif Systems, 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/documentation/esp32_datasheet_en.pdf.

FAGUNDES, Minéia Capellari; MORAES, Marcelo Oliveira; SCHAFFER, Decio; QUEIROZ, Tadeu Miranda de. Calibração de sensores para determinação do teor de água do solo. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 9, n. 1, p. 53–58, 2011. Disponível em: https://www.unemat.br/revistas/rcaa/docs/vol9/artigo5_v9_n1_2011.pdf.

FOLEY, Jonathan A. *et al*. Global consequences of land use. **Science**, [s. l.], v. 309, n. 5734, p. 570–574, 2005. Disponível em: https://doi.org/10.1126/science.1111772.

GARCIA, Fernando; ARAÚJO, Maria do Socorro Bezerra de; LEITE, Antonio Celso de Souza; GARCIA, Rodolfo Cavalcanti; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. Evolução da agricultura de precisão: uma revisão. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 17, n. 6, p. 4761–4812, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4761-4812.

GARCIA, Vitor. **Sensor de pressão microeletrônico baseado no efeito piezomos**. 2006. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Campinas, SP, Brasil, 2006.

GOMES, Rafael; MOSCA, Eduardo; AQUINO, Carlos; BRAGA NETO, Antonio Rodrigues; PIMENTA, Ivo A. Agricultura de precisão integrando de rede em malha IoT e computação em nuvem. **Revista de Ciência da Computação**, Vitória da Conquista, v. 6, n. 1, p. 5–12, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.22481/recic.v6i1.15229.

INGRAO, Carlo; STRIPPOLI, Rossana; LAGIOIA, Giovanni; HUISINGH, Donald. Water scarcity in agriculture: an overview of causes, impacts and approaches for reducing the risks. **Heliyon**, [s. l.], v. 9, n. 8, p. e18507, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18507.

LAWLOR, David W. Limitation to photosynthesis in water-stressed leaves: stomata vs. metabolism and the role of ATP. **Annals of Botany**, [s. l.], v. 89, n. 7, p. 871–885, jun. 2002. Disponível em: https://doi.org/10.1093/aob/mcf110.

LIMA, Jorge Enoch Furquim Werneck; FERREIRA, Raquel Scalia Alves; CHRISTOFIDIS, Demetrios. O uso da irrigação no Brasil. *In*: **O estado das águas no Brasil**. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 1999.

LOCONSOLE, Danilo; ELIA, Michele; CONVERSA, Giulia; DE LUCIA, Barbara; CRISTIANO, Giuseppe; ELIA, Antonio. Soil moisture sensing technologies: principles, applications, and challenges in agriculture. **Agronomy**, [s. l.], v. 15, n. 12, art. 2788, 2025. Disponível em: https://doi.org/10.3390/agronomy15122788.

MAROUELLI, Waldir Aparecido. **Tensiômetros para o controle de irrigação em hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2008. 15 p. (Circular técnica, n. 57). Disponível em: https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/780870.

NSOH, Bryan *et al*. Internet of things-based automated solutions utilizing machine learning for smart and real-time irrigation management: a review. **Sensors**, [s. l.], v. 24, n. 23, art. 7480, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s24237480.

NXP SEMICONDUCTORS. **MPX5100, 0 to 100 kPa, differential, gauge, and absolute integrated pressure sensors**: data sheet: technical data. Rev. 14. [s. l.]: NXP Semiconductors, 2018. Disponível em: https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/MPX5100.pdf.

PARIDA, Debapriya; BEHERA, Asish; NAIK, Jagdish Kumar; PATTANAIK, Soumyaranjan; NANDA, Rajat Sekhar. Real-time environment monitoring system using ESP8266 and ThingSpeak on Internet of Things platform. *In*: INTERNATIONAL

CONFERENCE ON INTELLIGENT COMPUTING AND CONTROL SYSTEMS (ICCS), 2019, [s. l.]. **Proceedings** [...]. [S. l.: s. n.], 2019. p. 225–229. Disponível em: https://doi.org/10.1109/ICCS45141.2019.9065451.

PEREIRA, Gilroy P.; CHAARI, Mohamed Z.; DAROGE, Fawwad. IoT-enabled smart drip irrigation system using ESP32. **IoT**, [s. l.], v. 4, n. 3, p. 221–243, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/iot4030012.

PEREIRA, Rodrigo Moura; SANDRI, Delvio; RIOS, Gervásio Fernando Alves. Tensiômetros eletrônicos integrados a placa microcontroladora Arduino no manejo da irrigação de alface em diferentes potenciais matriciais críticos e tipos de solo. **Irriga**, Botucatu, v. 27, n. 2, p. 311–327, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.15809/irriga.2022v27n2p311-327.

PEREIRA, Rodrigo Moura; SANDRI, Delvio; RIOS, Gervásio Fernando Alves; SOUSA, Daniel Ataydes de Oliveira. Automation of irrigation by electronic tensiometry based on the Arduino hardware platform. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 15, n. 4, art. 2567, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2567.

PIMENTEL, Carlos. **A relação da planta com a água**. Seropédica, RJ: EDUR, 2004. 191 p.

QUY, Vu Khanh *et al*. IoT-enabled smart agriculture: architecture, applications, and challenges. **Applied Sciences**, [s. l.], v. 12, n. 7, art. 3396, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/app12073396.

REICHARDT, Klaus. **Água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Solo, planta e atmosfera**: conceitos, processos e aplicações. 4. ed. Barueri: Manole, 2022.

RICHARDS, Lisa A. Soil moisture tensiometer materials and construction. **Soil Science**, [s. l.], v. 53, p. 241–248, 1942. Disponível em: https://doi.org/10.1097/00010694-194204000-00001.

RODRIGUES, Lineu Neiva; DOMINGUES, Antonio Félix (ed.). **Agricultura irrigada**: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. 1. ed. Brasília, DF: Inovagri, 2017. Disponível em: http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1081898.

SANCHES, Arthur C.; ALVES, Christopher de O.; JESUS, Fernanda L. F. de; THEODORO, Fagner L.; CRUZ, Thiago A. C. da; GOMES, Eder P. Low-cost and high-efficiency automated tensiometer for real-time irrigation monitoring. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 26, n. 5, p. 390–395, maio 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n5p390-395.

SILVA, Thalline Rodrigues da; LIMA, Armando César Rodrigues de; ALVES, Fernando Lima. Avanços digitais na irrigação de precisão: uma revisão sistemática de softwares para pivôs no estado de Goiás. **Revista Latino-americana de Ambiente Construído & Sustentabilidade**, [s. l.], v. 5, n. 23, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.17271/4rdh2b32.

SMAJSTRLA, A. G.; PITTS, D. J. **Tensiometer service, testing and calibration**. Gainesville: University of Florida, 1997. Disponível em: http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Tensiometro_de_Manometro/Tensiometer%20Service,%20Testing%20and%20Calibration.htm.

TOVAR SOTO, J. P.; PAREJA FIGUEREDO, C. F.; GARCÍA NAVARRETE, O. L.; GUTIÉRREZ MARTINEZ, L. C. Performance evaluation of LoRa technology for agricultural applications in rural areas. **DYNA**, [s. l.], v. 88, n. 216, p. 69–78, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.88258.

TSAI, Yi-Zhih; CHENG, Ming-Liang; HUANG, Qun-Zhan; LO, Wei-Cheng; LI, Ming-Hsu; HSU, Shao-Yiu. Effect of effective saturation and ceramic cup properties on the response time of tensiometers. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 582, art. 124445, mar. 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124445.

ZAFAR, Saima; MIRAJ, Ghosia; BALOCH, Rajaa; MURTAZA, Tanzeel; ARSHAD, Khadija Tehseen. An IoT based real-time environmental monitoring system using Arduino and cloud service. **Engineering, Technology & Applied Science Research**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 3238–3242, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.48084/etasr.2144.