



**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL GOIANO - CAMPUS URUTAÍ
BACHARELADO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

PROTÓTIPO DE SENSOR DE UMIDADE DO SOLO DE BAIXO CUSTO

IBSEN BESERRA BORGES

URUTAÍ – GO
Fevereiro de 2024

IBSEN BESERRA BORGES

Trabalho de curso apresentado ao curso de Engenharia Agrícola do Instituto Federal Goiano – Campus Urutaí, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Orientador: Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva.

URUTAÍ – GO
Fevereiro de 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

Borges , Ibsen Beserra
B B732p Protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo /
Ibsen Beserra Borges ; orientador Anderson
Rodrigo da Silva. -- Urutaí, 2024.
39 p.

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola) -- Instituto Federal
Goiano, Campus Urutaí, 2024.

1. Calibração. 2. Irrigação. 3. Textura do solo. I. da Silva,
Anderson Rodrigo , orient. II. Título.



TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- Tese (doutorado) Artigo científico
 Dissertação (mestrado) Capítulo de livro
 Monografia (especialização) Livro
 TCC (graduação) Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Ibsen Beserra Borges

Título do trabalho:

Protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo

Matrícula:

2019101200640236

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

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

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Urutá - GO

Local

12 / 03 / 2024

Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(ê)



Documento assinado digitalmente

ANDERSON RODRIGO DA SILVA

Data: 13/03/2024 06:45:22-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>



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

Formulário 2/2024 - DPGPI-UR/CMPURT/IFGOIANO

PROTÓTIPO DE SENSOR DE UMIDADE DO SOLO DE BAIXO CUSTO

IBSEN BESERRA BORGES

Trabalho de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Agrícola do Instituto Federal Goiano – Câmpus Urutaí, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrícola.

Defendido e aprovado pela Comissão Examinadora em: 26/02/2024.

(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. Anderson Rodrigo da Silva

Orientador

(assinado eletronicamente)

Prof^a. Dr^a. Raiane Ferreira de Miranda

Examinadora

(assinado eletronicamente)

Prof. Dr. Renato Paiva de Lima

Examinador

Documento assinado eletronicamente por:

- Raiane Ferreira de Miranda, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/03/2024 16:34:40.
- Renato Paiva de Lima, Renato Paiva de Lima - Professor Avaliador de Banca - Universidade de São Paulo (63025530000104), em 12/03/2024 13:49:13.
- Anderson Rodrigo da Silva, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 12/03/2024 13:13:45.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 12/03/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 582715

Código de Autenticação: e176112e01



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Urutai

Rodovia Geraldo Silva Nascimento, Km 2.5, SN, Zona Rural, URUTAÍ / GO, CEP 75790-000

(64) 3465-1900

DEDICATÓRIA

À minha família, em especial, meus pais que sempre priorizaram a minha educação.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram, em especial, aos colegas de sala, que com o foco de todos, elevaram o nível de educação da turma com união e dedicação.

À minha namorada, que sempre esteve comigo nos momentos mais difíceis.

E aos meus professores, que nunca mediram esforços para me educar da melhor forma.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente à Deus, pela oportunidade de ter me privilegiado por conseguir passar por todos esses momentos vivo e saudável.

Agradeço, especialmente, meus pais por serem minha base e ter me propiciado a oportunidade de ter uma boa educação.

Agradeço, também, a todos os meus professores que passaram todas essas experiências, sempre com o intuito de educar e ensinar para me tornar um bom profissional - isso eu devo a eles. Em especial, ao meu orientador, que me fez sentir confiante para os desafios acadêmicos e profissionais, com seu elevado nível educacional.

E, por último, não menos importante, a minha namorada e amigos, que sempre estiveram ao meu lado nos momentos que mais precisei.

“A ignorância é inimiga da evolução.”

(Autor desconhecido).

RESUMO

O conteúdo de água é um atributo dinâmico importante do solo, em especial para a agricultura, sendo necessário para se realizar o manejo da água de irrigação. A determinação da umidade do solo em laboratório apresenta baixa aplicabilidade em larga escala. Há sensores de alta precisão no mercado, mas são, em geral, de alto custo. Objetivou-se calibrar e prototipar sensores de umidade do solo de baixo custo, avaliando-os quanto à precisão em solos com diferentes texturas. Dois tipos de sensor de umidade foram utilizados: do tipo resistivo (modelos hl-69 e HD-38) e capacitivo (modelo V1.2). O preço desses sensores no mercado varia de R\$10,00 a R\$70,00. O sensor TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), modelo HH2 com haste ML3 ThetaProbe (Delta-T), com precisão nominal acima de 90%, foi utilizado como referência para o ajuste de equações de calibração dos sensores de baixo custo. As calibrações foram feitas em duas amostras de solo, com teor de argila de 398 e 136 g/kg solo, coletados na região de Ipameri-GO. Foram feitos ensaios de calibração em vasos de 5L, saturados com água até a capacidade de campo e deixados secar ao ar livre por tempo indeterminado. Leituras diárias foram realizadas entre os meses de fevereiro a maio de 2023. O coeficiente de determinação foi utilizado para avaliar o grau de ajuste dos modelos de calibração, do tipo linear e exponencial. A equação para o sensor resistivo hl-69, de mais baixo custo, apresentou $R^2 > 0,85$ para as duas amostras. Já o sensor HD-38 apresentou o maior resultado para o solo com teor de argila de 136 g/kg, chegando a $R^2 = 0,90$. O sensor V1.2 capacitivo apresentou maiores resultados para a amostra com teor de argila de 398 g/kg, $R^2 = 0,89$, e $R^2 = 0,75$ para outra amostra. O protótipo, portátil, foi construído utilizando cano PVC e um módulo microcontrolador com tecnologia WiFi para transferência de dados de leituras. Uma bateria 9V alimenta o sistema. O protótipo permite adotar ambos os sensores de umidade calibrados. O custo final do protótipo utilizando o sensor resistivo hl-69 foi de R\$110,00.

Palavras-chave: Calibração; Irrigação; textura do solo.

ABSTRACT

Water content is one of the most important dynamic attributes of soil, especially for agriculture, and it is extremely necessary for irrigation management. The determination of soil moisture in the laboratory has low applicability on a large scale. There are high-precision sensors on the market, but they are generally expensive. The objective of this work was to calibrate and prototype low-cost soil moisture sensors. Two types of sensors were used: resistive (models hl-69 and HD-38) and capacitive (model V1.2). The price of these sensors on the market varies from BRL 10.00 to 70.00. The TDR (Time Domain Reflectometry) sensor, model HH2 with ML3 ThetaProbe rod (Delta-T), with nominal accuracy above 90%, was used as a reference for fitting calibration equations for the low-cost sensors. The calibrations were carried out on two soil samples, with clay content of 398 and 136 g/kg soil, collected in the Ipameri, Goiás, Brazil. Calibration tests were carried out in 5L pots, saturated with water to field capacity and left to dry in open air for an indefinite period of time. Daily readings were made between February and May 2023. The coefficient of determination was used to evaluate the goodness-of-fit of the calibration models, linear and exponential. The equation for the hl-69 resistive sensor, which is the lowest cost, showed $R^2 > 0.85$ for both samples. The HD-38 sensor presented the best result for the soil with clay content of 136 g/kg, reaching $R^2 = 0.90$. The capacitive V1.2 sensor showed better results for the sample with clay content of 398 g/kg, $R^2 = 0.89$, and $R^2 = 0.75$ for another sample. The portable prototype was built using PVC pipe and a microcontroller module with WiFi technology to transfer reading data. A 9V battery powers the system. The prototype allows the adoption of both calibrated moisture sensors. The final cost of the prototype using the hl-69 resistive sensor was BRL 110.00.

Key words: Calibration; Irrigation; soil texture.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – A) Sensor de umidade do solo resistivo hl-69; B) Sensor de umidade do solo resistivo - hd-38.....	16
Figura 2 - Exemplo do sensor capacitivo utilizado na medição de umidade.....	17
Figura 3- Sensor de umidade do solo capacitivo V1.2.	17
Figura 4 - Sensor de umidade do solo TDR.....	18
Figura 5 - Arduino Uno.....	19
Figura 6. (A) S1 - higrômetro resistivo hl-69. (B) S2 resistivo HD-38. (C) S3 capacitivo V1.2.	20
Figura 7. Sensor TDR, de referência.....	21
Figura 8. Ilustração do esquema de montagem dos sensores no Arduino Uno.	21
Figura 9. (A) Leitura dos valores brutos dos sensores controlados pelo Arduino. (B) Leitura do sensor TDR, de referência.	21
Figura 10. (A) NodeMcuESP8266. (B) Bateria 9V.	22
Figura 11. (A) Cambo Jumpers. (B) Cola adesiva para tubo PVC.	23
Figura 12. (A) Tubo PVC 50mm. (B) Tampa do tubo PVC 50mm.....	23
Figura 13. (A) Sensor de umidade do solo hl-69 com ilustração de onde se deve passar o silicone para vedação. (B) Sensor de umidade do solo vedado e soldado na tampa do tubo PVC.....	23
Figura 14. (A) tampa do tubo PVC com o sensor. (B) interior da tampa do tubo com o sensor.	24
Figura 15. (A) Suporte da bateria 9V. (B) suporte para a NodeMcu.	25
Figura 16. Cabo micro-usb com saída para bateria 9V.....	25
Figura 17. Conexão do sensor de umidade do solo à NodeMcu.....	26
Figura 18. (A) Bibliotecas necessárias para a NodeMcu. (B) Variáveis para conectar na rede desejável; ssid = nome da rede; password = senha da rede.	26
Figura 19. Função handleRoot.....	27
Figura 20. Função handleNotFound.....	27
Figura 21. Função setup.....	28
Figura 22. Função loop.....	28
Figura 23. Monitor serial do sketch, o qual mostra a visualização do endereço IP.....	28
Figura 24. Página webserver do programa com o valor do sensor de umidade do solo.....	29
Figura 25. Gráfico da análise comparativa do sensor S1 - resistivo hl-69 com o sensor TDR, para amostra 06AOB.....	30
Figura 26. Gráfico da análise comparativa do sensor S1 - resistivo hl-69 ao sensor TDR, para amostra 10AOB.....	30
Figura 27. Gráfico da análise comparativa do sensor S2 - resistivo HD-38 em relação ao sensor TDR, para amostra 06AOB.....	31
Figura 28. Gráfico da análise comparativa do sensor S2 - resistivo HD-38 em relação ao sensor TDR, para amostra 10AOB.....	31
Figura 29. Gráfico da análise comparativa do sensor S3 – capacitivo V1.2 em relação ao sensor TDR, para amostra 06AOB.....	32
Figura 30. Gráfico da análise comparativa do sensor S3 - V1.2 capacitivo em relação ao sensor TDR, para amostra 10AOB.....	32
Figura 31. (A) Interior inferior do protótipo. (B) interior superior do protótipo.....	33
Figura 32. Protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Média de preços dos sensores de umidade do solo de baixo custo disponíveis no mercado, cotados em janeiro de 2024.....	15
Tabela 2. Caracterização física das amostras de solo utilizadas para a calibração dos sensores.....	20
Tabela 3. Equações de calibração de sensores de umidade do solo em diferentes amostras.....	33
Tabela 4. Preços dos materiais utilizados para construção do protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo, cotados em abril de 2023	34

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1 Água no solo	13
2.2 Métodos de determinação de umidade do solo	14
2.2.1 Método Gravimétrico	15
2.2.2 Método Resistivo	16
2.2.3 Método Capacitivo	16
2.2.4 Reflectometria do domínio do tempo (TDR)	17
2.3 Arduino	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1 Calibração	20
3.2 Construção do protótipo	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
5. CONCLUSÃO	35
6. REFERÊNCIAS	36

1. INTRODUÇÃO

A produção agrícola é altamente demandante de água, seja de irrigação ou não. Segundo a ANA – Agência Nacional de Águas, a atividade agrícola é o maior uso de água do Brasil e do mundo, correspondendo à metade da água retirada do País, muito influenciado pela irrigação, o que torna a necessidade do conhecimento aprofundado nesse assunto para ter maior eficiência de aplicação de água (GAVA et al., 2016). Para isso, o monitoramento acurado da umidade do solo é uma saída para a realização do manejo sustentável de irrigação.

A compatibilidade de equipamentos com a Internet das Coisas (IoT – Internet of Things), permite a conexão de inúmeros sensores que podem fornecer dados de produção, que pode auxiliar diretamente o uso racional de insumos, como a água (ALBUQUERQUE, 2023).

A determinação da umidade do solo é uma das propriedades mais importantes do solo, tradicionalmente sendo estimado em laboratório, pelo método gravimétrico de secagem em estufa, que é acurado, porém demorado. Entretanto, há vários sensores que podem trazer respostas confiáveis, (precisão acima de 90%) como é o caso dos sensores de velocidade de pulso eletromagnético baseados em TDR – Reflectometria do Domínio do Tempo, e os sensores de capacitância por FDR - Reflectometria no Domínio da Frequência, porém o custo e a forma de operação são fatores limitantes para o uso em larga escala. Não obstante, o uso de sensores pode propiciar respostas rápidas e resultados coerentes, sendo necessário, para estimar a umidade do solo, de calibrações, em condições de campo ou de laboratório, a fim de melhorar a precisão nos resultados (CRUZ et al. 2010; MORAIS et al. 2015).

Também há outros medidores indiretos de umidade do solo, como os blocos de resistência elétrica, tensiômetros e irrigas (SOUSA et al. 2019). Além disso, há os sensores de baixo custo que utilizam meios de condutividade elétrica e capacitância, como os modelos hl-69, HD-38 e V1.2, com preços médios de, respectivamente, R\$11,60, R\$68,90 e R\$13,80.

Jiménez (2018) realizou a calibração do sensor hl-69 em quatro tipos de solos representativos do Estado do Pernambuco para agricultura irrigada, e potencializou o uso deste sensor profissionalmente, em que os valores de R^2 resultou acima de 0,9, mostrando que o sensor apresentou um desempenho muito bom. Entretanto, não se recomenda seu uso sem calibração prévia. Alves (2022) realizou um protótipo de mini-estação meteorológica de baixo custo utilizando o sensor de umidade do solo HD-38. A avaliação desse sensor apresentou qualidade e confiabilidade no registro dos dados, em que foi possível registrar as variáveis de umidade do solo, apresentando bons resultados no que se refere à aferição de oscilações de umidade, entre os estados de solo seco e úmido, em que se percebeu que no seu projeto, é viável a utilização do sensor em campo. Brum (2022), realizou um estudo em seu projeto, o qual verificou-se fatores que interferem na calibração do sensor capacitivo V1.2, em que foi possível verificar que tipos

de solo, volume da amostra, intervalo de tempo entre as coletas afetam diretamente na calibração desses sensores.

Os sensores de solo de baixo custo podem ser desenvolvidos a partir de microcontroladores programáveis ou computadores de placa única, como é o caso do Arduino, microcontrolador programável de código aberto, que processa entradas e saídas por meio de sensores e possibilita a comunicação de um sistema com o ambiente através de hardware e programa (ALMEIDA et al., 2019; PELLICCIA et al., 2018; SOUSA, 2019).

O presente trabalho visa a calibração e a prototipagem de sensores de umidade do solo de baixo custo, avaliando-os quanto à precisão em solos com diferentes texturas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Água no solo

De acordo com a ANA (2021), no Brasil há 5,3 milhões de hectares equipados para irrigação. No entanto, apesar de ser adotada em aproximadamente 20% das terras produtivas, os quais respondem a 40% da produção global de alimentos, a agricultura irrigada é a prática que demanda maior quantidade de água doce no mundo, e a sua eficiência média global dos sistemas de irrigação é apenas 56% (FAO, 2017). Embora, a irrigação seja geralmente associada a um elevado nível tecnológico, é consenso que ainda é praticada de forma inadequada, com grande desperdício de água (MANTOVANI ET AL., 2006; MARQUELLI ET AL., 2008; ERTHAL E BERTICELLI, 2018).

Entender o movimento da água no solo e suas formas de armazenamento é essencial para a otimização de produção agrícola, sustentabilidade e conservação de ecossistemas (Souza et al., 2013; Carvalho, 2017). A determinação de curva de retenção de água do solo, que é a representação da relação entre o teor de água no solo e a energia com a qual está retida, é essencial para o estudo de solo-água, através da qual é possível determinar a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente (FILGUEIRAS et al., 2016), comumente utilizados no manejo de irrigação. Solos com texturas distintas tem um comportamento diferente entre essa relação, isto é, na mesma tensão de umidade do solo, o teor de umidade gravimétrica de um solo de textura fina é maior do que um solo de textura grossa.

Os microporos são responsáveis pela retenção da água no solo, em que a unidade volumétrica a tensão de aproximadamente 6kPa separa os mesoporos dos microporos. Assim, a umidade volumétrica é relacionada ao volume de microporos.

Segundo (DINIZ, 2017), a água de interesse para a agricultura está contida no intervalo de 0 a 1500 kPa, em que se destacam cinco pontos de umidade:

1. Umidade de saturação – Os poros estão totalmente preenchidos com água, isto é, o volume máximo, de água a ser armazenado no solo.
2. Umidade atual – É a umidade do solo no momento da medição. Quando próximo à umidade crítica, é o momento que poderá ser iniciado a irrigação.
3. Umidade crítica – Valor referência para a irrigação, relacionada com o esgotamento máximo da água no solo sem que haja danos à cultura.
4. Umidade na capacidade de campo – Quando o movimento da água livre no solo sob ação de gravidade estiver com intensidade muito lenta ou nula, conforme Carvalho, Sampaio e Silva (1996), sem variação de umidade com o tempo. Geralmente está associada a tensão de aproximadamente 10 kPa

5. Umidade no ponto de murcha permanente – É associada à tensão de 1500 kPa e está relacionada a um conteúdo de água no solo que resulta na não reparação da turgescência das folhas, quando colocada em ambiente de saturação de umidade.

Com esses dados de água no solo, é possível determinar, por exemplo, o intervalo hídrico ótimo (IHO), proposto por Silva et al. (1994), que consiste a água disponível para as plantas em função de fatores físicos limitantes, como resistência à penetração e porosidade do solo.

O uso de tecnologias eletrônicas e de automação pode aumentar a eficiência no uso da água, mas são, em geral, de alto custo. (BASSOI ET AL., 2009). Gomes et al., (2017) realizou a calibração de um sensor de umidade do solo resistivo hl-69 através da determinação da curva de retenção de água do solo utilizando a equação de van Genuchten (1980) e obteve uma estimativa do conteúdo de água do solo em função do sensor ajustado a um modelo linear com coeficiente de determinação R^2 acima de 97% validando a eficiência do sensor.

Já Oliveira (2018), realizou a calibração do mesmo sensor para diferentes texturas de solo através de equações de ajustes utilizando o método gravimétrico como referência, o qual obteve coeficientes de determinações para textura arenosa, argilosa, média e média com alto teor de matéria orgânica, respectivamente, $R^2 = 0,9899$, $R^2 = 0,9934$, $R^2 = 0,9859$, $R^2 = 0,9905$. Para cada tipo de solo, foram usados 6 sensores hl-69 obtendo comportamentos distintos entre si, necessitando de calibração individual. Também apresentou perda de sensibilidade quando submetidos a valores de umidade acima da capacidade de campo. Além disso, o solo com elevado teor de matéria orgânica (hidrofobicidade) apresentou menos regularidade nas leituras. No entanto, o autor concluiu que apesar das necessidades de calibração tanto individual como para diferentes texturas de solo, o seu baixo custo de aquisição torna-se a utilização desse sensor viável para faixas de umidade entre a água disponível no solo.

2.2 Métodos de determinação de umidade do solo

Para a determinação de umidade do solo, existem métodos diretos e indiretos, em que a escolha depende de fatores como disponibilidade de alguns equipamentos necessários e principalmente a precisão. No método direto, a água é extraída e quantificada por meio de equipamentos secantes, como estufa, sendo o principal método gravimétrico. Foi feito um levantamento (dezembro de 2023) de preços da análise de umidade do solo em laboratório na região do sudeste goiano, em que o preço pode variar de 15,00 a R\$20,00 por amostra.

Por outro lado, métodos indiretos são baseados na utilização de outras propriedades do solo, podendo ser físicas ou químicas associadas ao conteúdo de água. Por exemplo, resistência do solo a condutividade elétrica, capacitância, pressão, tensão da água no solo etc. (BUSKE, 2013). No entanto, a utilização de métodos indiretos requer calibração de equipamentos para garantia de resultados coerentes.

A utilização de sensores para a determinação indireta de umidade do solo viabiliza melhores informações nas tomadas de decisões, como relata Silva (2009), o uso dos sensores no campo poderia abrir novas portas para a agricultura de precisão, que utiliza dados anuais ou sazonais correspondentes às safras, ou seja, as informações desses sensores melhorariam no que se refere a disponibilidade de dados em tempo real para os tomadores de decisão de forma prática, econômica e eficiente.

Existem alguns sensores disponíveis no mercado que fornecem dados confiáveis com precisão até acima de 95%, como é o caso dos sensores baseados em TDR – reflectometria no domínio do tempo. Entretanto, o custo e a forma de operação desse tipo de equipamento são fatores limitantes ao uso de grande escala, com preços de AUD\$654,50 para o modelo TDR315-N (instrumentchoice.com.au, 2023), US\$945,00 para o modelo Spectrum TDR 150 (fondriest.com, 2023), podendo chegar até US\$1495,00 para o modelo fieldscout TDR350 (specmeters.com, 2023).

Embora, os sensores do tipo TDR são de elevado custo, há sensores de umidade do solo de baixo custo que utiliza o Arduino disponíveis no mercado, como os sensores resistivos higrômetro hl-69, sensores resistivos HD-38, e o sensores capacitivos, V1.2, com preços que variam de 10 a 75 reais (tabela 1).

Tabela 1. Médias de preços dos sensores de umidade do solo de baixo custo disponíveis no mercado, cotados em janeiro de 2024.

Sensores	Loja	Valor (R\$)	Valor médio (R\$)
hl-69	eletrogate.com.br	9,90	11,60
	baudaeletronica.com.br	10,90	
	casadarobotica.com	13,99	
HD-38	marinostore.com	71,90	68,90
	baudaeletronica.com.br	60,00	
	mamuteeletronica.com.br	74,80	
V1.2	usinainfo.com.br	13,50	13,80
	baudaeletronica.com.br	14,90	
	curtocircuito.com.br	12,90	

2.2.1 Método Gravimétrico

O método gravimétrico (Embrapa, 1997), padrão em análises laboratoriais é baseado em evaporação de água através de um forno secante. Uma amostra úmida é deixada em estufa a 105 °C por 24 horas. Em seguida, é pesada a amostra seca que permitirá estimar de forma exata o teor de água existente na amostra, seguindo a equação:

$$U = \frac{Mu - Ms}{Ms}$$

Onde:

Mu = Massa da amostra úmida;

Ms = Massa da amostra seca.

É um método de elevada precisão erve como referência para a calibração de outros métodos (PARIVA et al., 2012). Entretanto, há algumas desvantagens dessa técnica, pois necessita de equipamentos de laboratório precisos, geralmente de elevado custo. Além disso, é demorada, visto que é necessário o tempo de 24 horas para a secagem. Também é destrutivo, impossibilitando posteriormente a medida de umidade no mesmo ponto amostral (BERNARDO et al., 2005).

2.2.2 Método Resistivo

O método resistivo consiste na determinação da umidade do solo por meio de um equipamento composto por dois eletrodos, com base na alteração da condutividade elétrica do material (solução do solo, no caso). A relação entre o valor lido de resistência elétrica do sensor é inversamente proporcional ao teor de água, ou seja, quanto maior o valor de resistência menor será a umidade do solo. As principais vantagens da utilização do sensor resistivo de umidade do solo são o baixo custo de aquisição, a simples operação do sensor e a alta disponibilidade no mercado. (ALVES, 2020). Entretanto, conforme é descrito por Ferreira (2021), o sensor higrômetro hl-69 é sujeito a corrosão, pois os condutores necessitam estar em contato direto com o material, o que causa perda de acurácia com o passar do tempo.

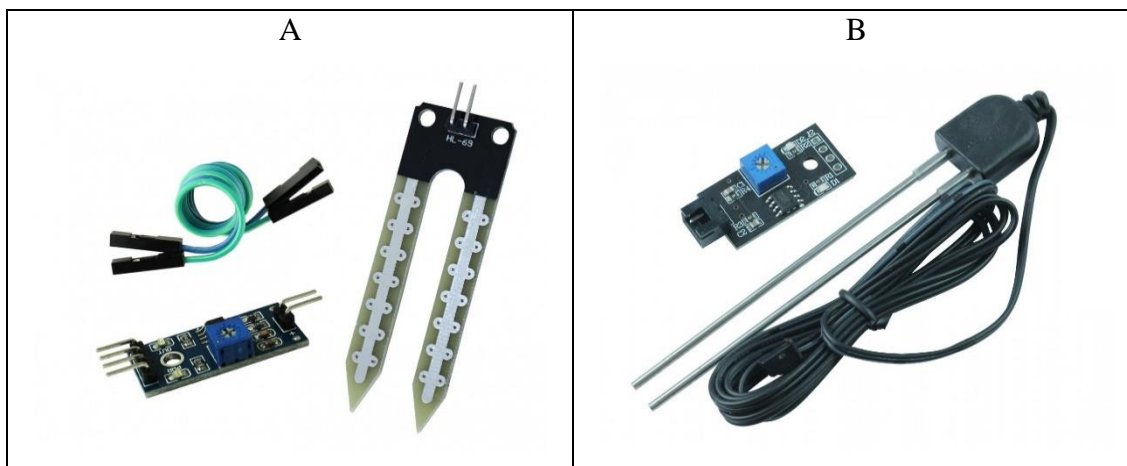


Figura 1 – A) Sensor de umidade do solo resistivo hl-69; B) Sensor de umidade do solo resistivo - hd-

38.

Fonte: usinainfo.com.br (2023).

2.2.3 Método Capacitivo

Os sensores capacitivos determinam a umidade do solo por meio da variação da capacitância entre dois ou mais condutores separados por um meio dielétrico, em resposta à variação de alguma propriedade física (RÊGO SEGUNDO, 2010). O sensor consiste também em dois eletrodos em formas de hastes que ficam distantes entre si e um material dielétrico ao redor que forma a capacitância. A

variação da capacitância ocorre quando um material (solução do solo, no caso) é depositado entre os dois eletrodos, ou seja, é o mesmo princípio do funcionamento de um capacitor, conforme ilustra a Figura 2 (FERREIRA, 2021).

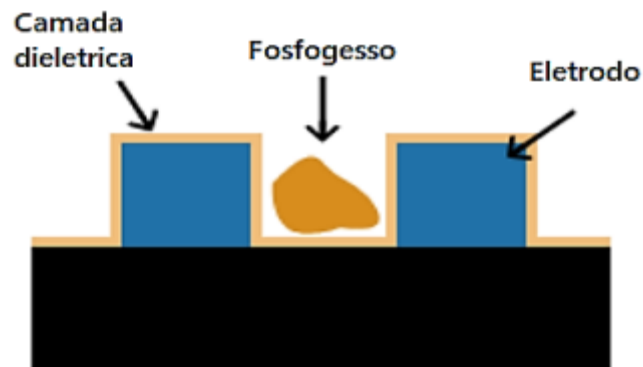


Figura 2 - Exemplo do sensor capacitivo utilizado na medição de umidade.

Fonte: Vilmar Pedro Votre (2019) (Adaptado).

O sensor capacitivo possui algumas vantagens e está sendo amplamente usado em pesquisas relacionadas a irrigação (Cruz et al. 2010). Além disso, após a correta calibração, a exatidão desses tipos de sensores é comumente alta, e conseguem operar em solos mais salinos que os sensores TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo), que costumam apresentar falhas nesse tipo de solo (CASTILHO, 2022).



Figura 3- Sensor de umidade do solo capacitivo – V1.2.

Fonte: usinainfo.com.br (2023).

2.2.4 Reflectometria do domínio do tempo (TDR)

Este método também depende da constante dielétrica do meio. O sensor TDR consiste em uma sonda formada por hastes metálicas, e é baseado na medição do tempo que leva o percurso de uma onda eletromagnética ao longo de uma haste até chegar no solo e ser refletida.

Arata (2022), relata que o sensor TDR, quando calibrado para diferentes texturas de solo, apresentou funcionamento simples e rápido e indicou ser confiável nas leituras. Entretanto, o seu elevado custo de aquisição pode ser um fator limitante e por isso, são mais usados para fins laboratoriais e de pesquisas (SINGH et al., 2019).



Figura 4 - Sensor de umidade do solo TDR.

Fonte: delta-t.co.uk (2023)

2.3 Arduino

O Arduino é uma plataforma de prototipagem eletrônica de código aberto cuja programação é C++ com algumas modificações (BRUM, 2022). É baseada em microcontroladores que podem operar de forma autônoma tornando possível a interação do ambiente com o dispositivo.

A plataforma é constituída de softwares e hardwares que possibilita a sua fácil utilização que é programada para controlar as entradas e saídas entre os dispositivos e os componentes conectados a ele (BANZI, 2012). O hardware consiste nos componentes físicos dos projetos e o software é o que executa os comandos realizados através do IDE (Integrated Development Environment), o qual é um programa executado para a criação dos sketches, onde o usuário realiza o código da programação de forma simples.

Segundo Oliveira (2019), a principal vantagem dessa plataforma é que permite que pessoas com poucos conhecimentos da área possa desenvolver projetos com facilidade, visto que é feita a partir do compartilhamento de códigos e projetos que facilita no processo de desenvolvimento, apenas modificando os códigos para cada tipo de projeto.

O Arduino pode ser utilizado para várias funcionalidades na agricultura, já que pode ser usado para o monitoramento de temperatura, umidade do ar, umidade do solo, tempo de irrigação, acionamento de bombas etc.

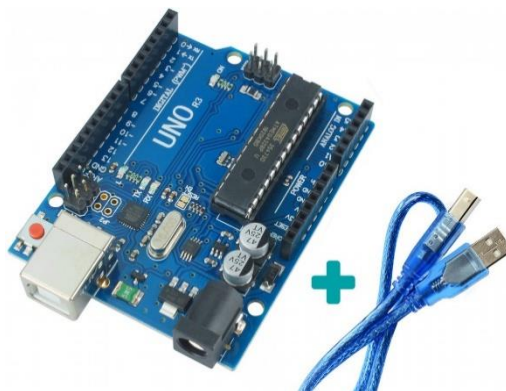


Figura 5 - Arduino Uno.

Fonte: usinainfo.com.br (2023)

Gomes et al., (2017) realizou a calibração de um sensor de umidade do solo resistivo hl-69 utilizando o Arduino a partir de diferentes tensões do solo utilizando funis de placa porosa para tensões de 1, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa e 33, 66, 100, 500 e 1500 kPa em aparelhos extratores de Richards. Foi ajustado o conteúdo de água no solo em função da tensão de água no solo através da equação de van Genuchten (1980) utilizando o programa RETEC v 6.02. (van GENUCHTEN, 2009). Concluiu-se que o sensor de baixo custo mostrou eficiência na determinação de umidade do solo necessitando apenas de calibração para diferentes tipos de solo. Além disso, também foi verificado que a área de contato do sensor é pequena, o que demanda maiores números de avaliações ao longo do perfil do solo para melhor representação da umidade do solo.

Já Sampaio et al., (2018) realizou o desenvolvimento de um protótipo de estufa inteligente para o cultivo de hortaliças utilizando sensores de umidade do solo e umidade do ar, temperatura e luminosidade ligados ao Arduino. Através dos sensores e equipamentos, o projeto permitia realizar irrigações de maneira automática. Além disso, também controlava a iluminação do ambiente, a qual tinha uma lâmpada na estufa que ligava com pouco ou sem iluminação e desligava com iluminação.

Guimarães et al., (2019) desenvolveu um protótipo de um sistema de irrigação por gotejamento automatizado utilizando Arduino com o uso da internet das coisas. Em seu trabalho, demonstra-se que é possível automatizar um sistema de irrigação por gotejamento de forma eficiente realizando todo o controle através de dados de sensores de umidade do solo. Além disso, a internet das coisas (IoT) permite que os dados sejam fornecidos ao usuário de forma remota e em tempo real. Para isso, foi utilizado o aplicativo móvel Blynk e um Ethernet Shield, que é um dispositivo, que acoplado ao Arduino permite a conexão à internet.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Calibração

Inicialmente, em campo, foram coletadas amostras de solo deformadas utilizando trado do tipo holandês em dois pontos distintos do assentamento rural Olga Benário, no município de Ipameri, Goiás. A identificação e caracterização física das amostras, de acordo com as análises feitas pelo Laboratório de Física do Solo do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, estão na Tabela 2.

Tabela 2. Caracterização física das amostras de solo utilizadas para a calibração dos sensores.

Id	Latitude, Longitude	Areia (g kg ⁻¹)	Silte (g kg ⁻¹)	Argila (g kg ⁻¹)	Curva de retenção de água*	R ²	C.C.	P.M.
06AOB	- 17,74487, -48,05023	447	156	398	$y = 0.1582 + (0.4505 - 0.1582)(1 + (0.1810x)^{1.8389})^{-0.4561}$	0.998	0.3139	0.1608
10AOB	- 17,70373, -48,01879	703	162	136	$y = 0.1117 + (0.4401 - 0.1117)(1 + (0.1772x)^{3.0331})^{-0.6703}$	0.999	0.2037	0.1117

*Modelo de van Genuchten (1980), em que y representa o conteúdo de água (g kg⁻¹) e x representa o potencial matricial (kPa). C.C.: capacidade de campo (kg kg⁻¹), P.M.: ponto de murcha permanente (kg kg⁻¹).

Foram colocadas as amostras em vasos plásticos de 5L e adicionado água até o escoamento superficial a fim de se obter a saturação do solo.

Os sensores de umidade do solo de baixo custo utilizados foram os do tipo resistivo, modelos hl-69 e HD-38, e do tipo capacitivo, modelo V1.2. Foi utilizado também o sensor de umidade do solo TDR, modelo HH2 com haste ML3 ThetaProbe (Delta-T), utilizado como referência para a calibração dos outros sensores (Figuras 6 e 7).

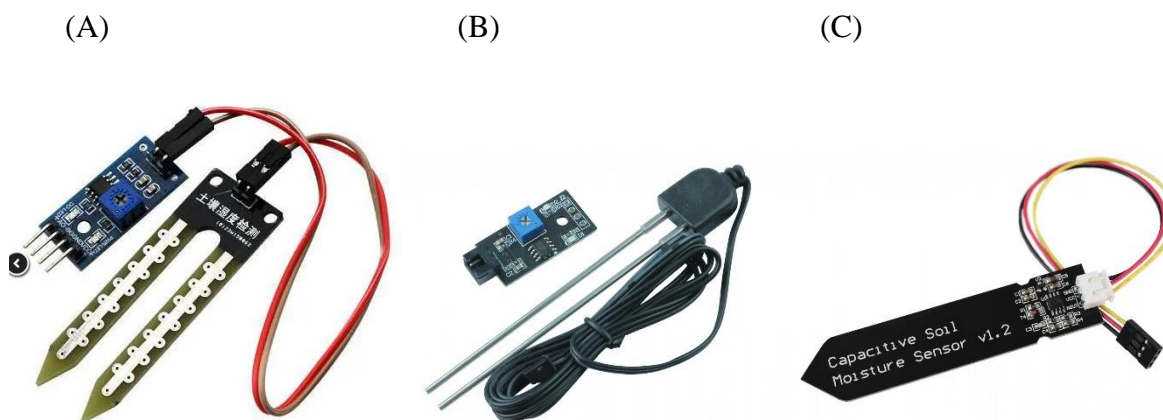


Figura 6. (A) S1 - resistivo hl-69. (B) S2 resistivo HD-38. (C) S3 capacitivo V1.2.

Fonte: usinainfo.com.br (2023).



Figura 7. Sensor TDR, de referência.

Fonte: delta-t.co.uk (2022).

Realizou-se as leituras dos sensores de umidade do solo de baixo custo utilizando a placa Arduino Uno, juntamente com um visor LCD para visualização das leituras, protoboard, bateria 9V e cabo jumpers (Figura 8). As leituras foram realizadas diariamente.

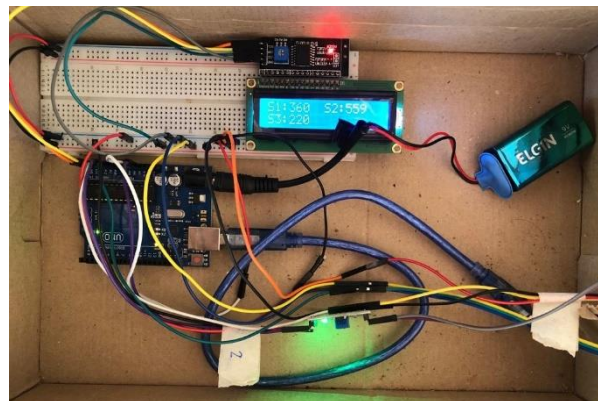


Figura 8. Ilustração do esquema de montagem dos sensores no Arduino Uno.

(A)



(B)



Figura 9. (A) Leitura dos valores brutos dos sensores controlados pelo Arduino. (B) Leitura do sensor TDR, de referência.

As leituras dos sensores foram realizadas, primeiramente, no período de agosto a dezembro de 2022 para a implementação dos códigos no Arduino Uno para leituras de múltiplos sensores e adaptação às leituras. Nessa parte inicial, as leituras dos sensores eram realizadas para cada amostra por vez, ou seja, realizavam-se as leituras em uma amostra, retiravam-se os sensores e realizavam as leituras nas outras amostras, posteriormente. Percebeu-se, que desse modo, caia muito a precisão nos resultados nas leituras dos sensores, pois ao retirar e colocar, influencia diretamente no contato da haste o sensor com o solo. Então, foram realizadas leituras de forma com que os sensores ficassem fixos a fim de obter maior precisão. Assim, foram realizadas leituras entre os meses de fevereiro à maio de 2023.

Ao final das leituras (Figura 9), para cada amostra de solo, modelos de regressão linear e não linear foram ajustados considerando a umidade do TDR como variável resposta (y) e os valores brutos dos sensores como variáveis explicativas (x). O grau de ajuste dos modelos foi mensurado pelo coeficiente de determinação (R^2).

3.2 Construção do protótipo

Para a construção do protótipo foram utilizados os seguintes materiais: sensor de umidade do solo, módulo ESP8266 NodeMcu ESP-12E com wifi V3, bateria 9V (Figura 10), jumpers fêmea-fêmea cola adesiva para tubo PVC (Figura 11), cabo micro-usb, conector clip da bateria 9V, tubo PVC 50 mm, tampa soldável de tubo PVC 50mm (Figura 12), cola instantânea, bicabornato.

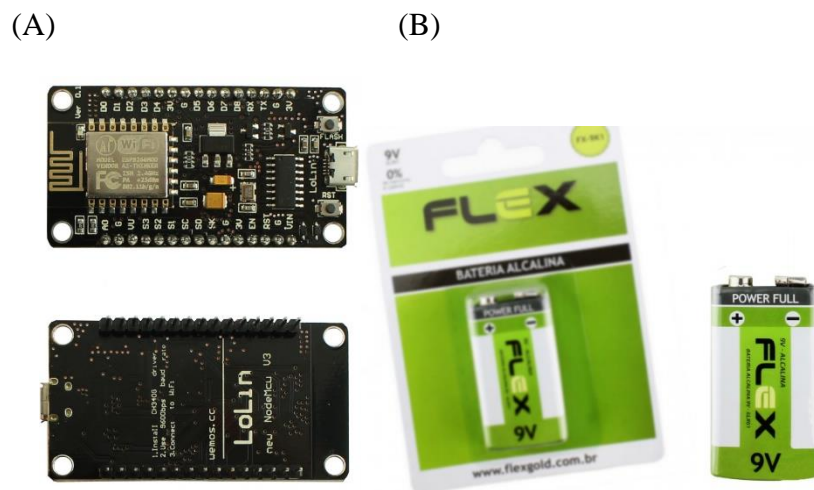


Figura 10. (A) NodeMcuESP8266. (B) Bateria 9V.

Fonte: usinainfo.com.br (2023).



Figura 11. (A) Cambo Jumpers. (B) Cola adesiva para tubo PVC.

Fonte: (A) usinainfo.com.br (2023). (B) refricompany.com.br (2023).

(A)

(B)



Figura 12. (A) Tubo PVC 50mm. (B) Tampa do tubo PVC 50mm.

Fonte: Leroymerlin.com.br (2023).

Inicialmente, na parte da conexão do cabo jumper do sensor de umidade do solo, é necessário passar silicone para vedar e evitar o contato, como está ilustrado na Figura 13B.

(A)

(B)

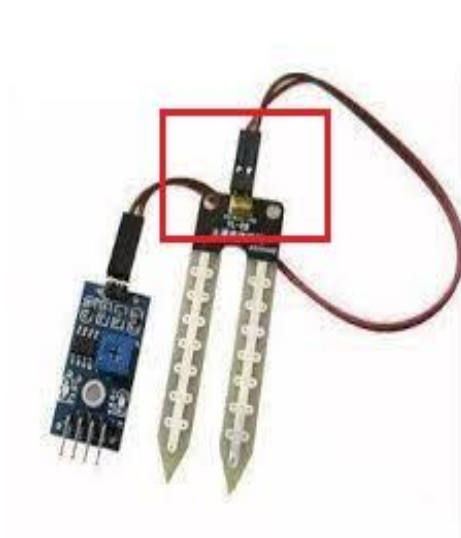


Figura 13. (A) Sensor de umidade do solo hl-69 com ilustração de onde se deve passar o silicone para vedação. (B) Sensor de umidade do solo vedado e soldado na tampa do tubo PVC.

Fonte: (A) smartprojectsbrasil.com.br (2023)

Para a fixação do sensor na tampa do tubo PVC, deve ser feito um corte na tampa do mesmo tamanho do sensor e soldá-los. A fixação do sensor foi feita através de cola instantânea e bicabornato de sódio, sendo necessário passar a cola nas bordas do corte da tampa e por todo o espaço em volta do sensor, tanto por cima da tampa quanto por baixo. Posteriormente, utilizou-se o bicabornato de sódio por cima da cola a fim promover soldagem de maior resistência (Figura 14).

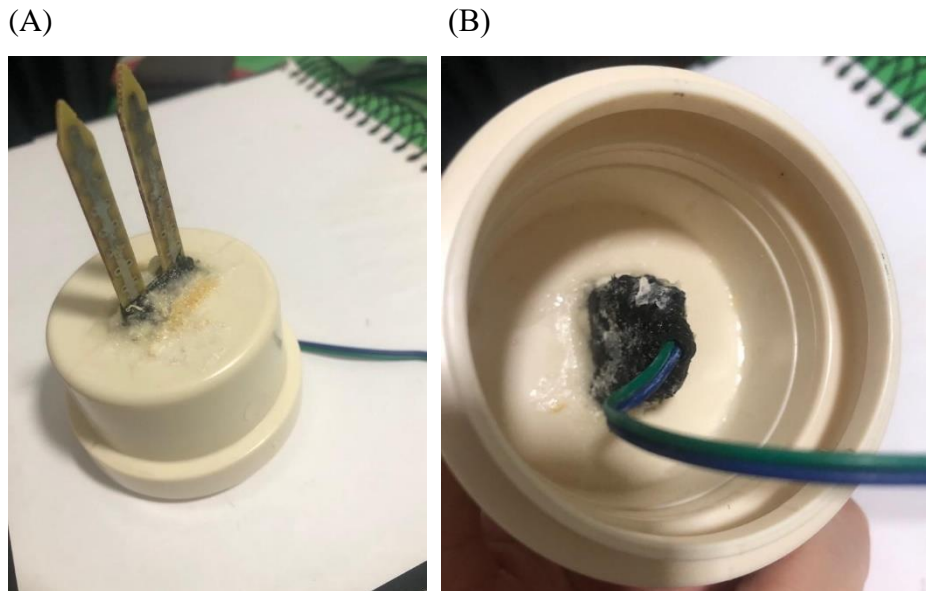


Figura 14. (A) tampa do tubo PVC com o sensor. (B) interior da tampa do tubo com o sensor.

O tubo PVC de 50 mm de diâmetro foi cortado para ter comprimento de cerca de 15 cm, o suficiente para comportar todos os materiais no interior do tubo. Na parte interior do tubo foi feita uma moldagem de um material plástico flexível para servir como suporte da bateria 9V. A soldagem desse material no tubo foi feita somente pela cola instantânea. Já para o módulo wifi foi fixado por meio de abraçadeiras plásticas, que também serviu como suporte para a NodeMcu (Figura 15).

(A)



(B)



Figura 15. (A) Suporte da bateria 9V. (B) suporte para a NodeMcu.

A NodeMcu contém um regulador de tensão de operação de 3.3V, a qual é feita através de um cabo micro-usb. No o cabo micro-usb foi feita uma adaptação para a alimentação via bateria 9V (Figura 16). Vale salientar que foram feitos testes para saber se o módulo comportaria a tensão de 9V da bateria sem resistores auxiliares.



Figura 16. Cabo micro-usb com saída para bateria 9V.

Já o sensor requer tensão de operação entre 3.3 e 5V. Dessa forma, o cabo de alimentação do sensor foi conectado à porta de 3.3V do módulo. Além disso, o sensor tem mais duas conexões

necessárias, que é o GND (terra) e analógica, sendo necessário conectar o GND na porta G do módulo, e o cabo analógico na porta A0 do módulo (Figura 17).

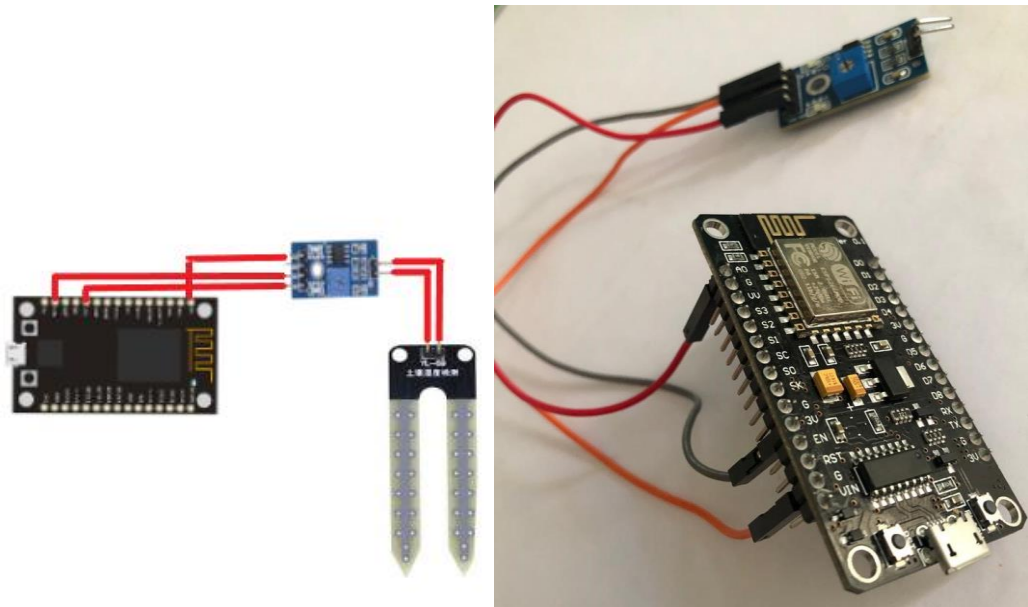


Figura 17. Conexão do sensor de umidade do solo à NodeMcu.

A tampa que contém o sensor foi soldada através da cola adesiva de tubo PVC no tubo a fim de ficar fixa, visto que deverá ter condições de resistência suficiente para o sensor penetrar no solo. Já a outra tampa foi apenas encaixada para permitir a possibilidade de manutenção ou até mesmo ligar o protótipo na bateria, visto que será ligada somente na realização da leitura.

A lógica de programação foi feita para realizar a leitura do sensor através de um WEBSERVER, isto é, o programa conectará a rede de internet e disponibilizará um endereço IP para o acesso e visualização do valor lido pelo sensor.

(A)

(B)

```
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <ESP8266WebServer.h> const char* ssid = "*****";
#include <ESP8266mDNS.h>      const char* password = "*****";
```

Figura 18. (A) Bibliotecas necessárias para a NodeMcu. (B) Variáveis para conectar na rede desejável; ssid = nome da rede; password = senha da rede.

```

ESP8266WebServer server(80);

void handleRoot() {

    String textoHTML;

    textoHTML += "Sensor de umidade do solo: ";
    textoHTML += analogRead(A0);
    |
    server.send(200, "text/html", textoHTML);
}

```

Figura 19. Função handleRoot.

```

void handleNotFound(){

    String message = "File Not Found\n\n";
    message += "URI: ";
    message += server.uri();
    message += "\nMethod: ";
    message += (server.method() == HTTP_GET)?"GET":"POST";
    message += "\nArguments: ";
    message += server.args();
    message += "\n";
    for (uint8_t i=0; i<server.args(); i++){
        message += " " + server.argName(i) + ": " + server.arg(i) + "\n";
    }
    server.send(404, "text/plain", message);
}

```

Figura 20. Função handleNotFound.

```

void setup(void) {
  Serial.begin(115200);
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);
  Serial.println("");

  // Wait for connection
  while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
    delay(500);
    Serial.print(".");
  }
  Serial.println("");
  Serial.print("Connected to ");
  Serial.println(ssid);
  Serial.print("IP address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  if (MDNS.begin("esp8266")) {
    Serial.println("MDNS responder started");
  }
  server.on("/", handleRoot);

  server.on("/inline", [](){
    server.send(200, "text/plain", "this works as well");
  });
  server.onNotFound(handleNotFound);
  server.begin();
  Serial.println("HTTP server started");
}

```

Figura 21. Função setup.

```

void loop(void) {
  server.handleClient();
}

```

Figura 22. Função loop.

Assim que carregar o sketch, deverá abrir o monitor serial para visualização do endereço IP da webserver disponibilizado pelo programa, como está ilustrado na figura 19. Caso apareça somente uma sequência de “.”, significa que houve algum erro na conexão da rede.



Figura 23. Monitor serial do sketch, o qual mostra a visualização do endereço IP.

É necessário copiar o endereço IP disponibilizado pelo programa no navegador para o acesso a webserver que mostrará o valor lido pelo sensor (Figura 24), que é atualizado periodicamente.



Figura 24. Página webservice do programa com o valor do sensor de umidade do solo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os sensores apresentaram valores correlacionados com os do sensor TDR. Os modelos de regressão ajustados apresentaram, em todos os casos, coeficiente de determinação acima de 0.6. Em geral a relação entre o valor do sensor e o valor de umidade de referência foi descrito por modelo exponencial.

O sensor resistivo hl-69 permitiu modelo de calibração com R^2 acima de 0,85 para as duas amostras, chegando a aproximadamente 0,9 para amostra 10AOB (Figuras 25 e 26).

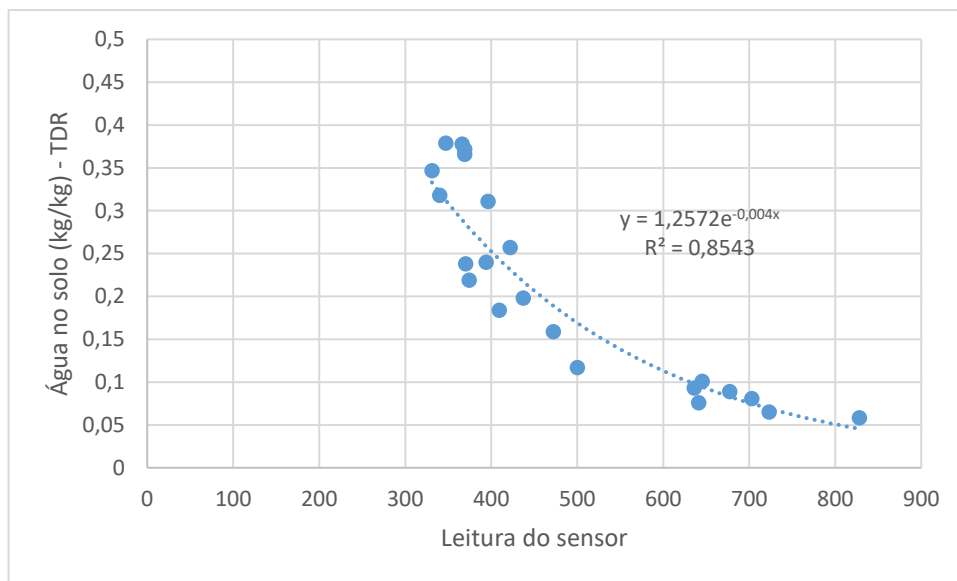


Figura 25. Gráfico da análise comparativa do sensor S1 - resistivo hl-69 com o sensor TDR, para amostra 06AOB.

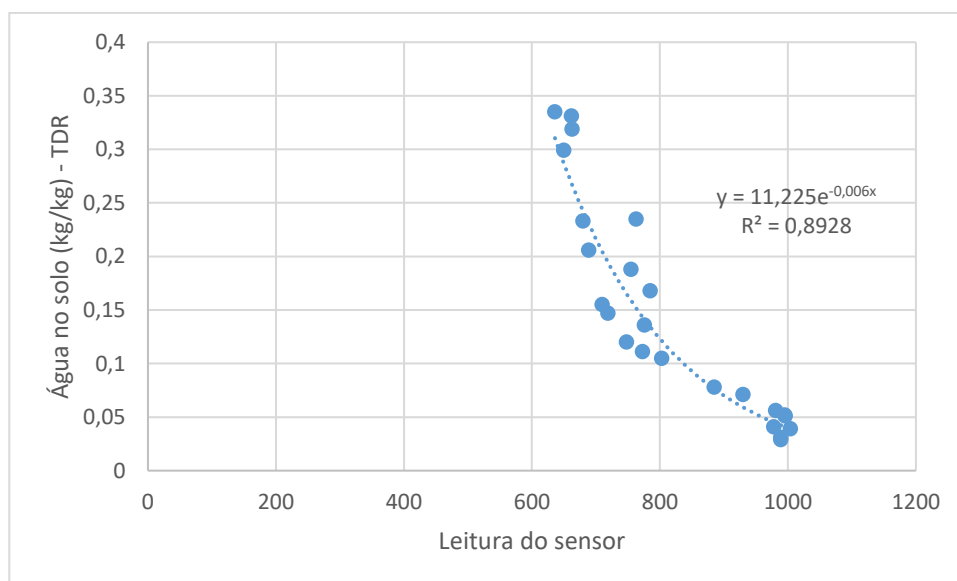


Figura 26. Gráfico da análise comparativa do sensor S1 - resistivo hl-69 ao sensor TDR, para amostra 10AOB.

O resistivo HD-38 obteve o coeficiente de determinação de 0.6 para o solo com teor de argila >35% (06AOB), com relação linear (Figura 27). No entanto, para o solo com teor de argila <15% (amostra 10AOB) foi o mais preciso, com $R^2 > 0,9$ (Figura 28).

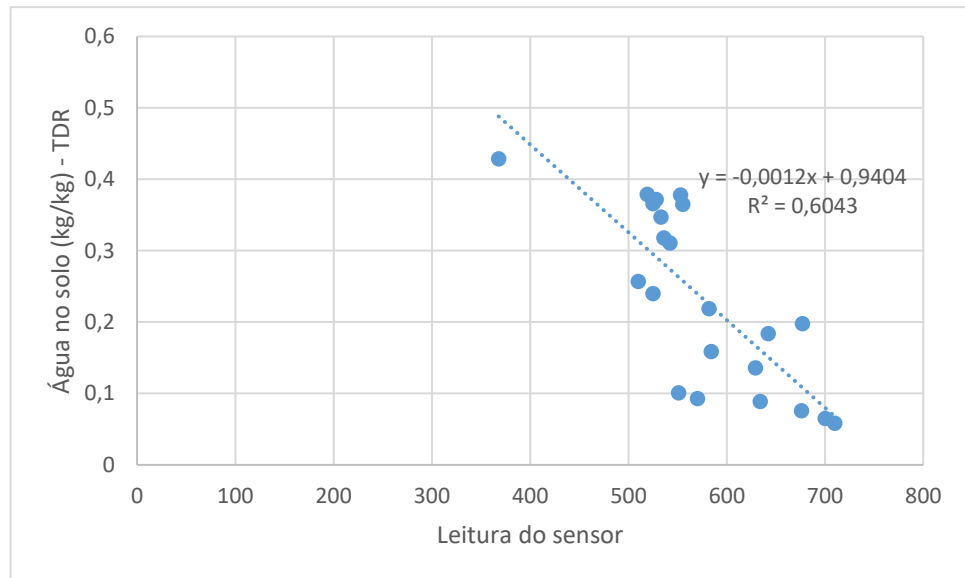


Figura 27. Gráfico da análise comparativa do sensor S2 - resistivo HD-38 em relação ao sensor TDR, para amostra 06AOB.

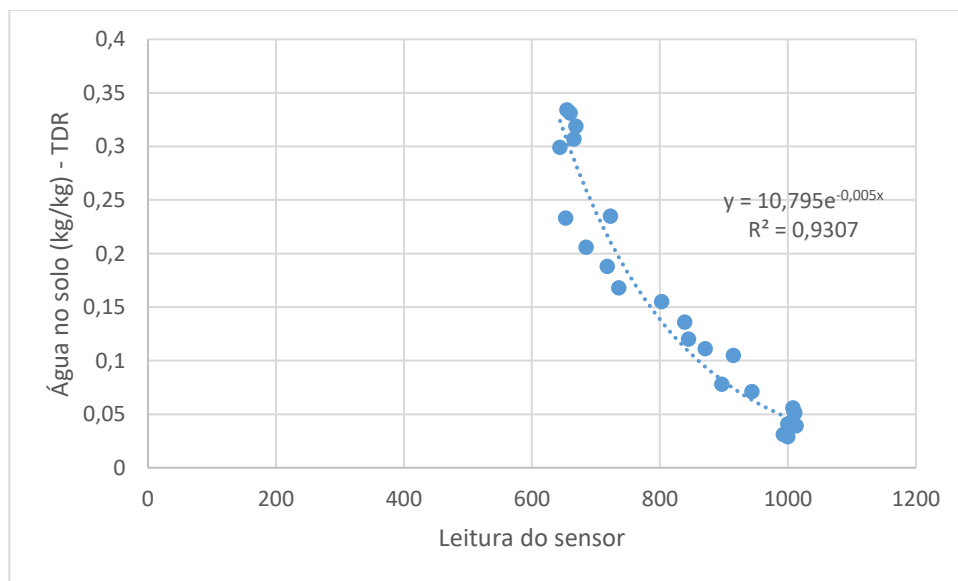


Figura 28. Gráfico da análise comparativa do sensor S2 - resistivo HD-38 em relação ao sensor TDR, para amostra 10AOB.

O sensor capacitivo V1.2, obteve o coeficiente de determinação de 0,89 para a amostra 06AOB e 0,75, para amostra 10AOB (Figuras 29 e 30).

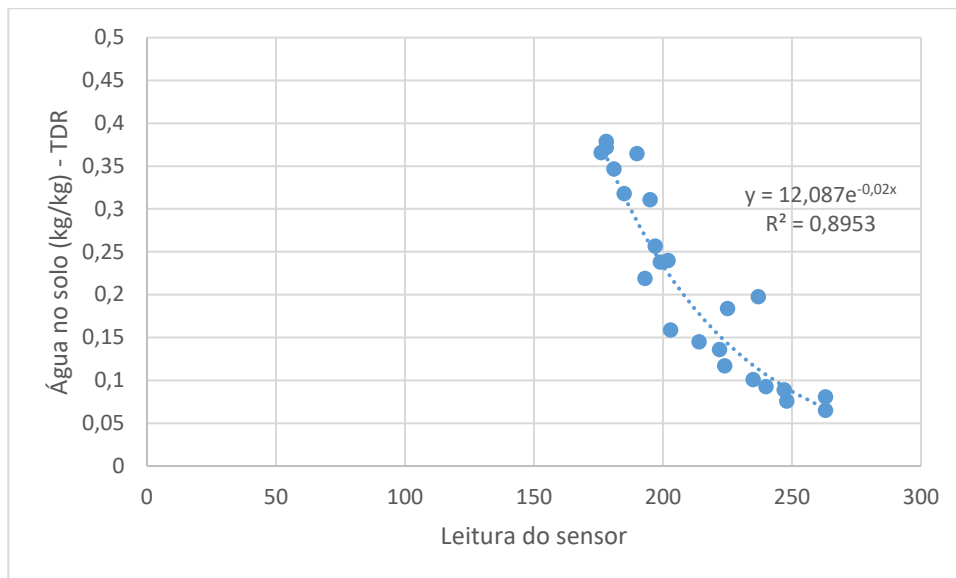


Figura 29. Gráfico da análise comparativa do sensor S3 – capacitivo V1.2 em relação ao sensor TDR, para amostra 06AOB.

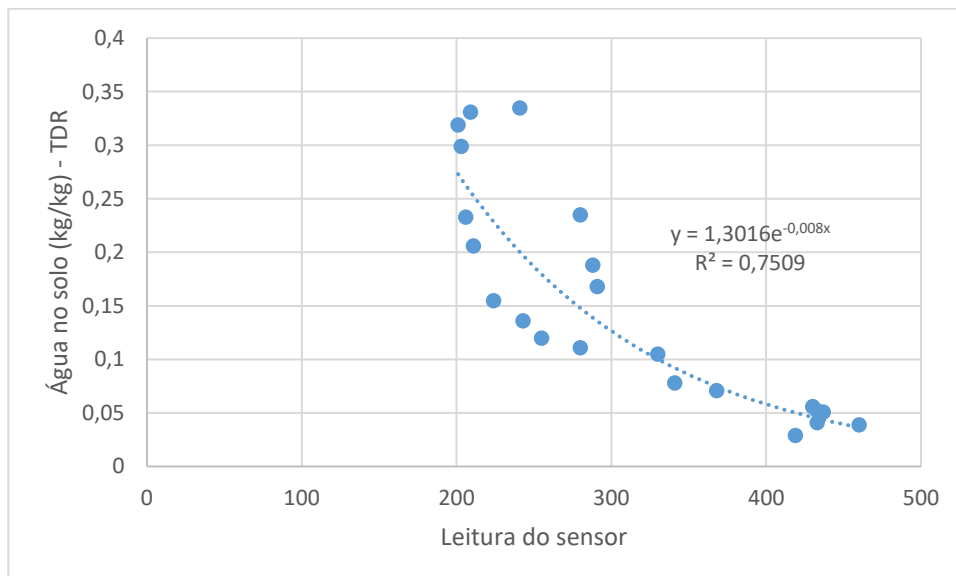


Figura 30. Gráfico da análise comparativa do sensor S3 – capacitivo V1.2 em relação ao sensor TDR, para amostra 10AOB.

A textura do solo promoveu diferenças na calibração dos sensores.

Conforme a Tabela 3, os modelos de ajustes foram lineares e não lineares (exponencial), de acordo com o grau de ajuste do coeficiente de determinação.

Tabela 3. Equações de calibração de sensores de umidade do solo em diferentes amostras.

Sensor	Amostra	Modelo ajustado	R ²
hl-69	06AOB	$y = 1,2572e^{-0,004x}$	0,85
	10AOB	$y = 11,22e^{-0,006x}$	0,89
HD-38	06AOB	$y = 0,9404 + -0,012x$	0,60
	10AOB	$y = 10,795e^{-0,005}$	0,93
V1.2	06AOB	$y = 12,087e^{-0,02}$	0,89
	10AOB	$y = 1,3016e^{-0,008}$	0,75

O protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo resultou em um objeto que pode fornecer estimativas de umidade do solo confiáveis, úteis para o monitoramento de áreas irrigadas, necessitando de calibração para cada tipo de solo, considerando especialmente a textura.

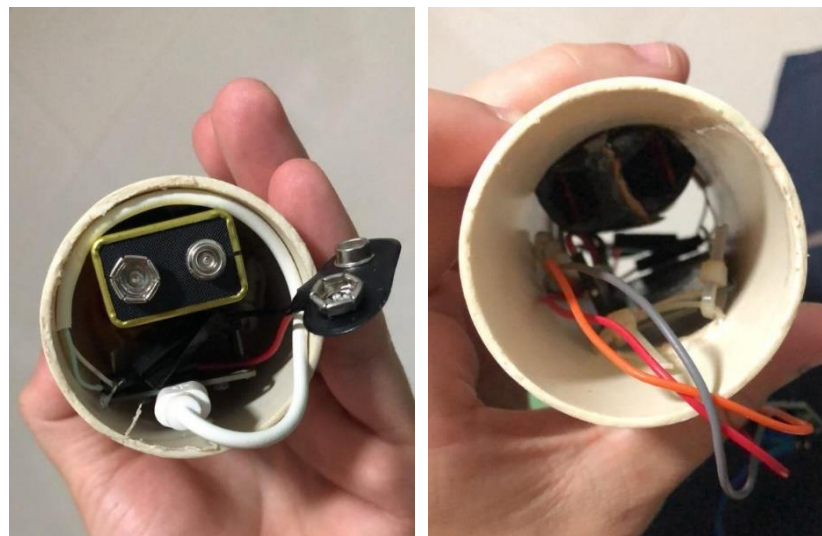


Figura 31. (A) Interior inferior do protótipo. (B) interior superior do protótipo.



Figura 32. Protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo.

Foi feito um levantamento de custos de todos os materiais necessários para a construção do protótipo do sensor de umidade do solo de baixo custo, que resultou em um custo de aproximadamente R\$110,00, considerado baixo em relação aos equipamentos disponíveis no mercado e aos custos de determinação laboratorial. A Tabela 4 contém as cotações dos materiais utilizados...

Tabela 4. Preços dos materiais utilizados para construção do protótipo de sensor de umidade do solo de baixo custo, cotados em abril de 2023

Materiais	Valor (R\$)	Loja
NodeMcu ESP8266	R\$ 35,00	baudaeletronica.com.br
Sensor de umidade do solo hl-69	R\$ 10,90	baudaeletronica.com.br
Bateria 9V	R\$ 15,00	Loja local (Cristalina/GO)
Cabo micro-usb	R\$ 8,90	baudaeletronica.com.br
Clip bateria 9V	R\$ 1,20	baudaeletronica.com.br
Jumpers F-F (10 fios 20cm)	R\$ 4,69	baudaeletronica.com.br
Tubo PVC 50mm (1 m)	R\$ 15,00	Loja local (Cristalina/GO)
Tampa do tubo PVC 50mm	R\$ 5,00	Loja local (Cristalina/GO)
Cola adesiva para tubo PVC	R\$ 5,00	Loja local (Cristalina/GO)
Cola instantânea	R\$ 6,00	Loja local (Cristalina/GO)
Bicabornato de sódio	R\$ 3,00	Loja local (Cristalina/GO)
TOTAL	R\$ 109,69	

5. CONCLUSÃO

É economicamente viável prototipar sensores de umidade do solo de baixo custo utilizando equações de calibração distintas para cada classe textural de solo.

As estimativas de umidade obtidas com sensores de baixo custo calibrados são semelhantes aos de um TDR de amplo uso e aceitação, podendo ser construído um protótipo com custo final de aproximadamente R\$110,00 (abril, 2023).

Vale salientar que ao construir o protótipo, calibrações pelo método gravimétrico (estufa) devem ser realizadas para maiores resultados quanto à precisão.

6. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.** - 2. ed. -- Brasília: ANA, 2021

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2022: informe anual / Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.** - Brasília : ANA, 2023.

ALBUQUERQUE, B. L. C. **Desenvolvimento de um sensor de umidade do solo utilizando DGS baseado na geometria matrioska** / – 2023. 59 f.: il. Dissertação (Mestrado – Engenharia Elétrica) Instituto Federal da Paraíba – IFPB

ALMEIDA, B. M.; SOUZA, J. S. S.; SANCHES, J. R.; OLIVEIRA, J. H. V.; GAMBARATO, V. T. S. **Integração de sistema mobile com sistemas que utilizam a plataforma arduino aplicados à agricultura.** *Tekhne e Logos*, v. 10, n. 2, p. 62-75, 2019.

ALVES, A. A. **Mini estação meteorológica de baixo custo para uso na agricultura.** Monografia - Curso de Agronomia, Instituto de Desenvolvimento Rural, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022.

ALVES, B G. S. et al. **Análise da durabilidade e eficiência de sensores resistivos de umidade do solo em plataforma Arduino.** 2020. Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2020.

ARATA, C. U. et al. Calibração e medição da umidade do solo com sensor TDR. Anais da 14ª Jornada Científica – Embrapa São Carlos – 14 de setembro de 2022. **Embrapa Instrumentação e Embrapa Pecuária Sudeste** – São Carlos SP, 2022.

BANZI, M. **Primeiros Passos com Arduino.** 1. ed. São Paulo: Novatec, 2012.

BASSOI, L. H. et al. **Agricultura de precisão e agricultura digital.** 2019.

BERNARDO, S.; Soares, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação.** 7ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611 p.

BRUM, M. L. et al. **Calibração de sensores capacitivos de baixo custo utilizando a plataforma arduino.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2022.

BUSKE, T, C. **Comportamento da umidade do solo determinada por métodos expeditos.** 2013. 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul. 2013.

CASTILHO, L. H. S. et al. **Estudo de uma solução para monitoramento remoto da umidade de solo por meio da tecnologia FRID e sensores capacitivos.** 2022. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CRUZ, T.M.L.; TEIXEIRA, A dos S.; CANAFÍSTULA, F.J.F.; SANTOS C.C. dos; OLIVEIRA, A.D.S. de; DAHER, S. Avaliação de sensor capacitivo para o monitoramento do teor de água do solo. *Engenharia Agrícola*, v.30, n.1, p.33-45, 2010.

DE CARVALHO, N. L.; DE BARCELLOS, A. L. Educação ambiental: importância na preservação dos solos e da água. 2017.

DINIZ, A. M. et al. **Sistema automatizado de aquisição, em tempo real, de umidade e temperatura do solo na irrigação**. 2017. 76 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Paraná, 2017.

ERTHAL, E. S.; BERTICELLI, R. Sustentabilidade: Agricultura irrigada e seus impactos ambientais. **Ciência & Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 64-74, 2018.

FAO, O. DIAS N. U. PARA A. E A A. **Agricultura Irrigada Sustentável no Brasil: Identificação de Áreas Prioritárias**. 2017.

FERREIRA, A. M. **Tomometria por impedância elétrica aplicada na determinação de umidade em amostras de fosfossolo**. 2021.

FILGUEIRAS, R. et al. Modelos de curva de retenção de água no solo. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 115-115, 2016.

GAVA, R.; DA SILVA, E. E.; BAIO, F. H. R. Calibração de sensor eletrônico de umidade em diferentes texturas de solo. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 10, n. 2, p. 154-162, 2016.

GENUCHTEN, M. T. van. (1980). **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils**. **Soil Science Society of America Journal**, 44:892-898.

GOMES, F. H. F. et al. Calibração de um sensor de umidade do solo de baixo custo. **Revista brasileira de agricultura irrigada**, v. 11, n. 4, p. 1509, 2017.

GUIMARÃES, R. S. et al. **Protótipo de um sistema de irrigação por gotejamento automatizado utilizando plataforma arduino com o uso da internet das coisas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Agrícola, Campus Universitário de Tomé-Açu, Universidade Federal Rural da Amazônia, Tomé-Açu, 2019.

JIMÉNEZ, A. Á. C. **Calibração do sensor de umidade do solo modelo HL-69 para manejo da irrigação**. Dissertação. Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, PE, 2018.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação: princípios e práticas. Viçosa: UFV, 2006. 318 p.

MORAIS, M.S., CRUZ, T.M.L., TEIXEIRA, A.S., DANTAS, L.A. & ARAÚJO, DCC. Calibração de sensor capacitivo de umidade do solo destinado ao cultivo de hortaliças. **In: XXV CONIRD – Congresso Nacional de Irrigação e Drenagem**, 08 a 13 de novembro de 2015. São Cristóvão/SE: UFS, 2015.

OLIVEIRA, C. L. **Calibração de sensores de umidade do solo de baixo custo**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação de Agronomia) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Agronomia, Guaranhuns, BR – PE, 2018.

OLIVEIRA, W, D. **Arduino: uma ferramenta de construção de experimentos de física**. 2019. 82 f. Trabalho de Conclusão de Curso (especialização em Física) – Universidade Federal Fluminense, Santo Antônio de Pádua, 2019.

PARIVA, D. et al. A Review of the Methods Available for Estimating Soil Moisture and its Implications for Water Resource Management. **Journal of Hydrology**, v. 458- 459, p. 110 – 117, 2012.

PELLICCIA, L.; SCHUMANN, M.; DUDCZIG, M.; LAMONACA, M.; KLIMANT, P.; GIRONIMO, G. **Implementation of tactile sensors on a 3-Fingers Robotiq® adaptive gripper and visualization in VR using Arduino controller**. Procedia CIRP, v. 67, n. 1, p. 250-255, 2018.

RÊGO SEGUNDO, A. K. **Desenvolvimento de sensor de teor de água do solo e de sistema de controle e automação em malha fechada para uso em irrigação**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, 2010.

SAMPAIO, L. et al. Estufa Inteligente-Sistema Automatizado para o Cultivo de Hortaliças. In: **Anais do XVIII Escola Regional de Computação Bahia, Alagoas e Sergipe**. SBC, 2018. p. 135-140.

SILVA, B. C. P. **Manejo da irrigação via inteligência artificial na cultura do pimentão vermelho (Capsicum annuum L.)**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SILVA, M. A. M. **Rede de sensores para aplicação em agricultura: um estudo de caso**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.

SINGH, A. K.; BHARDWAJ, A. K.; VERMA, C. L.; MISHRA, V. K. Soil moisture sensing techniques for scheduling irrigation. **Journal of Soil Salinity and Water Quality**, v. 11, n. 1, p. 68–76, 2019.

SOUSA, E. D. T. S. **Desenvolvimento de plataforma multi-sensor de solos para uso em agricultura de precisão**. 2019. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais, 2019.

SOUZA, C. F. et al. Calibração de sonda FDR e TDR para a estimativa da umidade em dois tipos de solo. **Irriga**, v. 18, n. 4, p. 597-606, 2013.

