

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Sistema Capacitivo Sem Fio para Monitoramento da
Umidade do Solo em Diferentes Profundidades**

Luiz Carlos Gomes Sacramento Junior

2025



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**SISTEMA CAPACITIVO SEM FIO PARA MONITORAMENTO DA
UMIDADE DO SOLO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES**

LUIZ CARLOS GOMES SACRAMENTO JUNIOR

Sob a Orientação do Professor
Marcos Bacis Ceddia

e Coorientação do Professor
Cristiano de Souza de Carvalho

Tese submetida como requisito parcial
para obtenção do grau de **Doutor**, no
Programa de Pós-Graduação em
Agronomia – Ciência do Solo, Área de
Concentração em Pedologia e Física do
Solo.

Seropédica, RJ
Outubro de 2025

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S123s	Sacramento Junior, Luiz Carlos Gomes, 1979- Sistema capacitivo sem fio para monitoramento da umidade do solo em diferentes profundidades / Luiz Carlos Gomes Sacramento Junior – Seropédica, 2025. 89 f.: il. Orientador: Marcos Bacis Ceddia. Coorientador: Cristiano de Souza de Carvalho. Tese (Doutorado). – – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Agronomia-Ciência do Solo., 2025. 1. LoRa. 2. Internet das Coisas. 3. Eletromagnetismo. 4. Monitoramento contínuo de umidade do solo. I. Ceddia, Marcos Bacis, 1968-, orient. II. Carvalho, Cristiano de Souza de -, coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-graduação em Agronomia-Ciência do Solo. IV. Título.
-------	---

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que citada a fonte.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE
JANEIRO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
AGRONOMIA (CIÊNCIAS DO SOLO)



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 24/ 2025 - CPGACS (12.28.01.00.00.00.27)

Nº do Protocolo: 23083.061310/2025-90

Seropédica-RJ, 20 de outubro de 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

INSTITUTO DE AGRONOMIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO

LUIZ CARLOS GOMES SACRAMENTO JUNIOR

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo, Área de Concentração em Pedologia e Física do Solo.

TESE APROVADA EM 07/10/2025.

Marcos Bacis Ceddia. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Marcos Gervasio Pereira. Dr. UFRRJ
Felipe da Rocha Henriques. Dr. CEFET/RJ
Gustavo de Mattos Vasques. Dr. Embrapa Solos
Wenceslau Geraldes Teixeira. Dr. Embrapa Solos

(Assinado digitalmente em 20/10/2025 14:42)
MARCOS BACIS CEDDIA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DATS (11.39.00.35)
Matrícula: 1220296

(Assinado digitalmente em 22/10/2025 08:11)
MARCOS GERVASIO PEREIRA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptS (12.28.01.00.00.00.33)
Matrícula: 1060711

(Assinado digitalmente em 21/10/2025 10:10)
FELIPE DA ROCHA HENRIQUES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 086.682.577-06

(Assinado digitalmente em 20/10/2025 14:58)
GUSTAVO DE MATTOS VASQUES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 084.272.437-07

(Assinado digitalmente em 20/10/2025 16:51)
WENCESLAU GERALDES TEIXEIRA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 054.559.398-07

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrRJ.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **24**, ano: **2025**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, datade emissão: **20/10/2025** e o código de verificação: **e20b56f371**

DEDICATÓRIA

*Aos meus parentes e amigos que sempre depositaram confiança em mim.
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A todos os meus familiares que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

À Vanessa Pacheco de Oliveira Lopes e a Lucas Pacheco pelo amor, carinho e dedicação durante essa jornada.

A Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, que me ofereceu a oportunidade de realizar este curso, ao PPGA-CS e a todos os professores que puderam contribuir para o meu aprendizado.

Aos professores Marcos Bacis Ceddia e Cristiano de Souza de Carvalho pela orientação, incentivo, paciência, confiança e amizade, sempre solícitos durante todo o trabalho.

Às amigas Izabela Gouveia, Ana Carolina de Souza e Gabriela Rodrigues, Mayara e Cinthia Dantas pela ajuda amizade e carinho.

Aos amigos de trabalho Diego Brandão, Fabrício Lopes e Silva, Valdinei Moraes, Guilherme Campos e todos os colegas do CEFET/RJ, *Campus* Nova Iguaçu.

Aos amigos das “quintas”, Evandro Gomes, Renatinho, Duda, Luciano (Marimbondo), Diego e Naldo.

Aos amigos Eduardo Paschoal, Leonardo e Matheus (LASA), pela ajuda no laboratório e no campo.

Aos amigos e amigas dos Laboratórios LASA e LMOS da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro; cada um teve um papel nesse trabalho.

Aos funcionários da secretaria do PPGA-CS, Marquinhos, Michele e Wagner, pela atenção e gentileza.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo da UFRRJ.

Enfim, a todos que contribuíram para conclusão desse trabalho.

Meus sinceros agradecimentos!

BIOGRAFIA

Luiz Carlos Gomes Sacramento Junior, filho de Vilma de Freitas e Luiz Carlos Gomes Sacramento, nascido em 12 de outubro de 1979 na cidade de Niterói, Estado do Rio de Janeiro. Ingressou na Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF) em 2003, no curso de Química formando-se em 2008. Nesse período atuou nas análises de fitoquímica em plantas da cidade de Campos dos Goytacazes. Em 2008, ingressou no curso de Engenharia de Controle e automação do CEFET/RJ, formando-se em 2009 e atuando na área de automação e robótica. Em 2014, ingressou no curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica no CEFET/RJ, concluindo-o em 2016, onde atuou em processamento de sinais biológicos. Durante o ano de 2016, foi aprovado no concurso para Professor do Ensino Básico Técnico e Tecnológico (EBTT) do CEFET/RJ, *Campus* Nova Iguaçu. Em 2021, iniciou o doutorado no Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, concluindo-o em outubro de 2025.

RESUMO

SACRAMENTO JUNIOR, Luiz Carlos Gomes. **Sistema capacitivo sem fio para monitoramento da umidade do solo em diferentes profundidades**. 2025. 89 f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2025.

O monitoramento remoto da umidade do solo em várias profundidades tem sido um desafio para diversos pesquisadores, uma vez que demanda sensores físicos adequados, acoplados a uma rede de coleta e transmissão de dados. Dentre as técnicas indiretas de estimativa da umidade do solo, destacam-se aquelas que utilizam princípios eletromagnéticos (como a constante dielétrica, a capacitância e a resistência elétrica do solo). Os sensores eletromagnéticos (sobretudo os baseados na constante dielétrica e na capacitância) têm apresentado boa precisão nas estimativas, além de oferecerem facilidade e segurança no uso, bem como possibilitarem o monitoramento contínuo de forma remota. Por outro lado, os sensores eletromagnéticos utilizados no Brasil são, em sua maioria, desenvolvidos em outros países, o que eleva os custos. Assim, o desenvolvimento de um sistema com tecnologia nacional para estimar a umidade do solo tem importância estratégica. Outro desafio relevante refere-se à construção de um sistema de transmissão de dados sem fio capaz de cobrir grandes distâncias. Nesse contexto, o presente trabalho propõe a construção de uma sonda segmentada para a estimativa da umidade do solo em diferentes profundidades, com transmissão de dados a longas distâncias. A construção física da sonda consistiu em pares de anéis de cobre de baixa resistência fixados em uma haste de resina, bem como em um circuito eletrônico capaz de converter valores de capacitância em tensão elétrica. A técnica indireta utilizada foi a da capacitância de alta frequência, gerada por um circuito *tank* composto pela associação entre indutor e capacitor. Quanto ao dimensionamento, obteve-se a maior faixa de capacitância ao se utilizarem anéis com 30 mm de altura e espaçamento de 30 mm entre si, para um segmento de sonda de aproximadamente 120 mm. A análise da faixa de capacitância é fundamental, pois está diretamente relacionada à sensibilidade da sonda e, conseqüentemente, a uma discretização mais adequada da umidade do solo. A placa de prototipagem eletrônica (TTGO T-Beam) foi utilizada no projeto para o condicionamento dos sinais recebidos da placa eletrônica, cuja função é converter a umidade do solo em tensão elétrica. Além disso, o sistema de transmissão de sinais sem fio, com tecnologia LoRa, conta com um TTGO situado em campo e outro TTGO localizado no Instituto de Agronomia da UFRRJ, distantes aproximadamente 642 m entre si. Os resultados obtidos da calibração da umidade do solo em função da tensão elétrica em condição de laboratório, a partir de solos com diversas classes texturais utilizando coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE), foram: Areia franca obteve $R^2 = 0,93$ e $RMSE = 0,0204$; Argiloarenosa $R^2 = 0,95$ e $RMSE = 0,0187$; Argila $R^2 = 0,90$ e $RMSE = 0,0362$, orgânico $R^2 = 0,92$ e $RMSE = 0,0400$. Em campo, a sonda multissegmentada foi capaz de estimar a umidade em três profundidades obtendo os seguintes resultados de calibração conforme a classe textural apresentada no perfil do solo em análise: Areia franca (10 cm), $R^2 = 0,98$ e $RMSE = 0,0073$; Franco-Argiloarenosa (30 cm), $R^2 = 0,94$ e $RMSE = 0,0139$; e Franco-Argiloarenosa (50 cm), $R^2 = 0,98$ e $RMSE = 0,0058$. Os resultados de calibração, tanto em laboratório quanto em campo, indicam que a sonda apresentou boa acurácia e robustez, podendo ser utilizada em diferentes situações em que o conhecimento da umidade do solo é essencial para a tomada de decisão como em sistemas de irrigação, alertas de movimentos de massa, monitoramento de barragens e contenção de encostas, bem como em estudos de modelagem dos fluxos de água no solo.

Palavras-chave: LoRa. Internet das Coisas. Eletromagnetismo. Monitoramento contínuo de umidade do solo.

ABSTRACT

SACRAMENTO JUNIOR, Luiz Carlos Gomes. **Wireless capacitive system for monitoring soil moisture at different depths.** 2025. 89 p. Thesis (Doctorate in Agronomy, Soil Science). Institute of Agronomy, Federal Rural University of Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, Brazil. 2025.

Remote monitoring of soil moisture at various depths has been a challenge for many researchers, as it requires suitable physical sensors coupled to a data collection and transmission network. Among the indirect techniques for estimating soil moisture, those that use electromagnetic principles (such as the dielectric constant, capacitance, and electrical resistance of the soil) stand out. Electromagnetic sensors (especially those based on the dielectric constant and capacitance) have shown good accuracy in estimates, in addition to offering ease and safety in use, as well as enabling continuous remote monitoring. On the other hand, the electromagnetic sensors used in Brazil are mostly developed in other countries, which increases costs. Thus, the development of a system with national technology to estimate soil moisture is of strategic importance. Another relevant challenge concerns the construction of a wireless data transmission system capable of covering long distances. In this context, this work proposes the construction of a segmented probe for estimating soil moisture at different depths, with long-distance data transmission. The physical construction of the probe consisted of pairs of low-resistance copper rings (sensor elements) fixed to a resin rod, as well as an electronic circuit capable of converting capacitance values into electrical voltage. The indirect technique used was high-frequency capacitance (HFC), generated by a tank circuit composed of an inductor and a capacitor. Regarding sizing, the widest capacitance range was obtained using rings 30 mm high and spaced 30 mm apart, for a probe segment of approximately 120 mm. Analysis of the capacitance range is fundamental, as it is directly related to the probe's sensitivity and, consequently, to a more accurate discretization of soil moisture. The electronic prototyping board (TTGO – T-Beam) was used in the project to condition the signals received from the electronic board, whose function is to convert soil moisture into electrical voltage. Furthermore, the wireless signal transmission system, using LoRa technology, has one TTGO (transmitter) located in the field and another TTGO (receiver) located at the Agronomy Institute of UFRRJ, approximately 642 m apart. The results obtained from the calibration of soil moisture as a function of electrical voltage under laboratory conditions, from soils with various textural classes using the coefficient of determination (R^2) and root mean square error (RMSE), were: Loamy sand obtained $R^2 = 0.93$ and $RMSE = 0.0204$; Clayey sandy soil $R^2 = 0.95$ and $RMSE = 0.0187$; Clay soil $R^2 = 0.90$ and $RMSE = 0.0362$, organic soil $R^2 = 0.92$ and $RMSE = 0.0400$. In the field, the multi-segmented probe was able to estimate moisture at three depths, obtaining the following calibration results according to the textural class presented in the soil profile under analysis: Loamy sand (10 cm), $R^2 = 0.98$ and $RMSE = 0.0073$; Sandy clay loam (30 cm), $R^2 = 0.94$ and $RMSE = 0.0139$; and Sandy clay loam (50 cm), $R^2 = 0.98$ and $RMSE = 0.0058$. The calibration results, both in the laboratory and in the field, indicate that the probe showed good accuracy and robustness, and can be used in different situations where knowledge of soil moisture is essential for decision-making such as in irrigation systems, mass movement alerts, dam monitoring and slope containment as well as in studies of soil water flow modeling.

Keywords: LoRa. Internet of Things. Electromagnetism. Continuous soil moisture monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tetraedro de silício. Fonte: Adaptado de Cresser; Killham; Edwards, 1993.....	3
Figura 2. Combinação das estruturas de tetraedros de silício. Fonte: Adaptado de (Cresser; Killham; Edwards, 1993).....	4
Figura 3. Estrutura de octaedro de alumínio e oxigênio. Fonte: (Cresser; Killham; Edwards, 1993).	5
Figura 4. Estrutura básica para formação da gibbsita. Fonte: (Cresser; Killham; Edwards, 1993).	5
Figura 5. Estrutura básica para formação da caulinita. Fonte: (Cresser; Killham; Edwards, 1993).	5
Figura 6. Estrutura básica do filossilicato do tipo 2:1. Fonte: (Cresser; Killham; Edwards, 1993).	6
Figura 7. (a) Polaridade e estrutura da molécula de água; (b) ligações intermoleculares da água com ponte de hidrogênio. Fonte: Adaptado de Lehninger; Nelson; Cox, 2013.	7
Figura 8. Linhas de campo entre duas partículas carregadas positivamente onde se tem a repulsão das linhas. Fonte: (Walker; Resnick; Halliday, 2014).	17
Figura 9. Linhas de campo entre duas partículas carregadas sendo uma positivamente e outra negativamente, tem-se a repulsão das linhas. Fonte: (Walker; Resnick; Halliday, 2014).	17
Figura 10. Visão geral do sistema instalado no campo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	28
Figura 11. Visão geral do sistema de monitoramento de umidade do solo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	28
Figura 12. Configuração para modelagem do elemento sensor. Fonte: Elaborado pelo Autor.	29
Figura 13. (a) Modelo de capacitor de placas paralelas horizontal e (b) Modelo de placas paralela na vertical. Fonte: Elaborado pelo Autor.	29
Figura 14. Simulação do vetor campo elétrico no segmento da sonda. Fonte: Elaborado pelo Autor.	31
Figura 15. Apresentação da construção física da sonda. Fonte: Elaborado pelo Autor.	32
Figura 16. Confeção da placa de fenolite para construção do protótipo. Fonte: Elaborado pelo Autor.	33
Figura 17. (a) Circuito montado na Protoboard; (b) Circuito montado na placa de fenolite com componentes DIP. Fonte: Elaborado pelo Autor.	33
Figura 18. Circuito ressonante LC. Fonte: Elaborado pelo Autor.	34
Figura 19. Circuito integrado MC1648P. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	34
Figura 20. Circuito integrado MC12017. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	35
Figura 21. Circuito integrado SN74HC393N. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	35
Figura 22. Circuito integrado LM331. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	35
Figura 23. Componentes para o processamento de sinal. Fonte: Elaborado pelo Autor.	36
Figura 24. Protótipo da placa eletrônica. Fonte: Elaborado pelo Autor.	37

Figura 25. Medições para análise do comportamento da placa eletrônica. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	38
Figura 26. Painel Solar para alimentação energética da sonda. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	39
Figura 27. Bateria para alimentação do sistema. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	39
Figura 28. Componentes internos do painel eletrônico. Fonte: Acervo fotográfico do Autor. Controlador de carga Knup AD60A.	42
Figura 29. Controlador de carga para painel solar Knup AD60A. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	42
Figura 30. Microcontrolador TTGO T-Beam. Fonte: Helium T-Beam.	43
Figura 31. Módulo Relé Aptoacoplador 4 canais modelo SRD-05VDC-SL-C. Fonte Acervo fotográfico do Autor.	44
Figura 32. Regulador de tensão modelo LM2596 Step-Down. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	45
Figura 33. Raspberry Pi 4. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	45
Figura 34. Montagem do sistema para calibração da sonda. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	47
Figura 35. Retirada da vegetação do local para instalação da sonda multissegmentada. Fonte: Acervo Fotográfico do Autor.	48
Figura 36. Processo de instalação da sonda: (a) Perfuração do solo para instalação da sonda multissegmentada; (b) Ajuste das paredes do solo com o tubo de acesso. Fonte: Acervo Fotográfico do Autor.	48
Figura 37. Inserção da sonda multissegmentada. Fonte: Acervo Fotográfico do Autor.	49
Figura 38. Conclusão da instalação do protótipo em campo. Arcevo fotográfico do Autor. ...	49
Figura 39. Trincheira aberta para coleta do solo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	50
Figura 40. Placa eletrônica para construção do protótipo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	53
Figura 41. Construção do protótipo: a) Estrutura física de resina; (b) ligação dos anéis de cobre com a placa eletrônica. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	53
Figura 42. Construção do protótipo: (a) Inserção da placa eletrônica no protótipo; (b) Protótipo com estrutura completa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	54
Figura 43. Montagem da sonda segmentada. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	54
Figura 44. Sonda segmentada com sistema de montagem dos segmentos. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	55
Figura 45. Sonda segmentada montada. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	55
Figura 46. Valores calculados e experimentais dos componentes do protótipo da placa eletrônica, utilizando Cauxiliar de 100 pF. Fonte: Elaborado pelo Autor.	57
Figura 47. Erros relativos dos componentes da placa em função da Cauxiliar. Fonte: Elaborado pelo Autor.	57

Figura 48. Ângulo de contato entre interfaces líquido-sólido-gás. Fonte: Adaptado de (Reichardt; Timm, 2012).	64
Figura 49. Curva de calibração para classe textural areia franca segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	64
Figura 50. Curva de calibração para classe textural argiloarenosa segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	65
Figura 51. Curva de calibração para classe textural argila segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.....	66
Figura 52. Curva de calibração para solo orgânico segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.....	67
Figura 53. (a) Abertura da trincheira próximo da instalação do sensor; (b) Coleta das amostras para realizar as análises química e física da calibração em condição de campo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	69
Figura 54. Curva de calibração para solo textura areia franca para sonda multissegmentada (10 cm) em condição de campo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	72
Figura 55. Curva de calibração para solo de textura Franco-argiloarenosa para sonda multissegmentada em condição de campo (30 cm). Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	73
Figura 56. Curva de calibração para solo franco-argiloarenosa para sonda multissegmentada em condição de campo (50 cm). Fonte: Acervo fotográfico do Autor.....	73
Figura 57. Tela de monitoramento do OpenHAB. Fonte: Acervo fotográfico do Autor	76
Figura 58. Valores calculados e experimentais dos componentes do protótipo da placa eletrônica, utilizando Cauxiliar de 10 pF. Fonte: Elaborado pelo Autor.	88
Figura 59. Valores calculados e experimentais dos componentes do protótipo da placa eletrônica, utilizando <i>Cauxiliar</i> de 56 pF. Fonte: Elaborado pelo Autor.....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Alguns minerais silicatados conforme arranjo estrutural.	4
Tabela 2. Resistividade aproximada de alguns materiais condutores.....	14
Tabela 3. Permissividade relativa (ϵ_r) de algumas substâncias.	19
Tabela 4. Comparação dos diferentes métodos de medição da umidade do solo.....	24
Tabela 5. Vantagens e desvantagens dos métodos de medição.	24
Tabela 6. Comparação das tecnologias de comunicação para redes sem fio.....	25
Tabela 7. Valores dos componentes eletrônicos utilizados no protótipo e na conversão de frequência em tensão elétrica.....	36
Tabela 8. Valores dos capacitores em pF utilizados na simulação para validação da placa eletrônica.....	38
Tabela 9. Consumo de corrente elétrica do sistema.	40
Tabela 10. Configuração feita no controlador de carga.....	43
Tabela 11. Valores de capacitância (pF) em relação a distância entre os anéis de cobre com a permissividade da água.....	52
Tabela 12. Valores de capacitância (pF) em relação a distância entre os anéis de cobre com a permissividade do ar.	52
Tabela 13. Valores da simulação da placa eletrônica com <i>Cauxiliar</i> 100 pF.....	56
Tabela 14. Eficiência energética em função dos dados meteorológicos.	58
Tabela 15. Análise física dos solos calibrados em condição de laboratório.....	61
Tabela 16. Análise química dos solos calibrados em condição de laboratório.	61
Tabela 17. Ajuste de calibração para diversos solos em condição de laboratório.....	62
Tabela 18. Valores máximos e mínimos da umidade do solo e da tensão elétrica dos solos em condição de laboratório.....	62
Tabela 19. Análise física do solo em condição de campo.	70
Tabela 20. Análise química do solo calibrado em condição de campo.	70
Tabela 21. Ajuste de calibração para solo em condição de campo.	71
Tabela 22. Valores máximos e mínimos da umidade do solo e da tensão elétrica dos solos em condição de campo.	71
Tabela 23. Valores da simulação da placa eletrônica com <i>Cauxiliar</i> 10 pF.....	87
Tabela 24. Valores da simulação da placa eletrônica com <i>Cauxiliar</i> 56 pF.....	88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Composição da Fase Sólida do Solo.....	3
2.2 Água no Solo	6
2.3 Retenção de Água no Solo.....	7
2.4 Tensão Superficial e Capilaridade	8
2.5 Energia da Água no Solo	8
2.6 Potencial Total da Água no Solo	8
2.6.1 Potencial gravitacional	9
2.6.2 Potencial pressão	9
2.6.3 Potencial mátrico.....	9
2.6.4 Potencial osmótico	10
2.7 Movimento de Água no Solo	10
2.7.1 Movimento da água em solos saturados.....	10
2.7.2 Movimento da água em solo não saturado	11
2.8 Conceitos Básicos de Eletromagnetismo	12
2.8.1 Carga elétrica e Lei de Coulomb.....	12
2.8.2 Cargas elétricas no solo.....	13
2.8.3 Condutores e isolantes.....	13
2.8.4 Condutividade elétrica e resistividade do solo.....	14
2.8.5 Corrente elétrica e corrente elétrica no solo.....	16
2.8.6. Potencial elétrico (tensão elétrica) e potencial elétrico no solo	16
2.9 Campo Elétrico (E) e Intensidade do Campo Elétrico.....	16
2.9.1 Campo elétrico no solo	17
2.9.2 Capacitância	18
2.9.3 Dielétrico.....	18
2.9.4 Influência do solo no campo elétrico gerado pelo sensor	20
2.10 Métodos de Determinação de Umidade do Solo	21
2.10.1 Método termo-gravimétrico	21
2.10.3 Método baseado em tensiometria.....	21
2.10.4 Método resistivo.....	22
2.10.5 Sonda de nêutrons	22
2.10.6 Radar de penetração no solo	22
2.10.7 Métodos capacitivos.....	23
2.10.8 Reflectometria no domínio do tempo (TDR)	23
2.10.9 Reflectometria no domínio da frequência (FDR).....	23

2.11 Transmissão de Dados sem Fio	25
2.11.1 Redes de sensores sem fio (RSSF).....	25
2.11.2 Desenvolvimento de sensores para estimar a umidade do solo	26
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1 Protótipo de um Sistema de Monitoramento Sem Fio de Umidade do Solo	27
3.1.1 Visão geral do sistema	27
3.1.2 Modelagem da sonda.....	28
3.1.3 Simulação da sonda.....	30
3.1.4 Projeto de construção física	31
3.1.5 Construção da placa eletrônica da sonda (Fenolite).....	32
3.1.7 Cálculo energético do sistema.....	40
3.1.8 Painel eletrônico.....	41
3.1.9 Raspberry Pi 4 model B e OpenHAB.....	45
3.1.10 Calibração dos segmentos sensores em laboratório	46
3.1.11 Calibração em situação de campo	47
3.1.12. Análises químicas e físicas do solo	50
3.1.13. Análises estatísticas.....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1. Resultado da Simulação para Construção Física	52
4.2. Confeção da Placa Eletrônica em SMD.....	52
4.3. Construção de um Segmento	53
4.4. Construção da Sonda Multisegmentada	54
4.5. Resultados Preliminares da Placa Eletrônica de Fenolite	56
4.6. Resultados da Eficiência Energética do Sistema	58
4.7. Análise de Desempenho da Distância em Função da Potência do Sinal (LoRa).....	58
4.8. Resultados da Calibração em Laboratório	59
4.9. Resultados da Calibração em Campo	68
4.10 Telas de Monitoramento (OpenHAB)	75
5. CONCLUSÕES	79
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
8. APÊNDICE	87

1. INTRODUÇÃO

O uso de sensores para auxiliar a produção agrícola vem aumentando consideravelmente com o passar dos anos. Nesse contexto, alguns termos como Agricultura de Precisão (AP) e *Smart* Agricultura enquadram-se nas tecnologias de sensoriamento remoto em tempo real, cuja a sua utilização possibilita o gerenciamento, de forma mais adequada, de diversos recursos naturais, mitigando o desperdício (AQEEL-UR-REHMAN; A. SHAIKH, 2009). Devido à alta variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo, o monitoramento da umidade do solo é de extrema importância, uma vez que a água é um elemento essencial para o desenvolvimento de diversas culturas, e o seu uso de maneira sustentável é um desafio na gestão hídrica, cujo objetivo de aumentar a eficiência (CHARTZOULAKIS; BERTAKI, 2015). Entretanto, a importância do monitoramento de umidade não se restringe à agricultura. Outras áreas de pesquisa, como a engenharia civil e a geotecnia, estudam o conteúdo de água no solo em contenções de estradas e eventos de movimento de massa. Em função disso, a busca por sensores cada vez mais robustos, com acurácia, e transmissão de dados sem a utilização de condutores elétricos tem sido a linha de pesquisa de vários laboratórios e empresas espalhados pelo mundo (ADAMCHUK et al., 2004; S.U. et al., 2014a; YU et al., 2021).

Há diversos métodos de determinação da umidade do solo, sendo eles diretos e indiretos, este últimos baseados em outra propriedade física para estimar a umidade (S.U. et al., 2014b). Dentre os métodos, o termogravimétrico (o único direto) é considerado padrão, pois amostras de solos são coletadas diretamente e o conteúdo hídrico é determinado através de pesagem (poucos erros associados). No entanto, esse método não é comumente utilizado para fins de monitoramento da umidade do solo em grandes áreas e experimentos científicos com vasos e parcelas pequenas. A determinação pelo método termogravimétrico demanda constantes trabalhos de campo, além disso, os resultados tornam-se disponíveis, no mínimo, 24 horas depois da coleta. Por fim, em áreas experimentais pequenas (vasos e parcelas) a coleta frequente de amostra pode comprometer os experimentos.

Visando reduzir os custos com cabos de alimentação e transmissão de dados, pesquisadores têm buscado desenvolver sistemas de monitoramento da umidade do solo que combinem um conjunto de sensores de medição indireta de umidade com transmissores de dados sem fio de baixo consumo energético (FERDOUSH; LI, 2014; MOGHADDAM et al., 2010). Basicamente, um sistema de sensoriamento voltado à estimativa da umidade do solo é composto por: (I) elemento sensor, (II) comunicação e (III) módulo de computação que integra hardware, software e algoritmo (Aqeel-ur-Rehman et al., 2014). Uma vez estimado o teor de umidade, a comunicação de dados é feita por meio de tecnologias sem fio, como Bluetooth, WiFi, ZigBee e LoRa (ABBASI et al., 2014). A combinação entre esses sensores, sistemas de comunicação e processamento de dados torna cada rede de sensores sem fio (RSSF) única, que é definida de acordo com os objetivos de cada trabalho, custos, logística disponível, consumo de energia, robustez e distância entre os locais de monitoramento e processamento. Nesse contexto, o presente trabalho optou por utilizar a tecnologia de comunicação LoRa (*Long Range*) devido ao seu longo alcance e baixo consumo de energia.

Considerando o estado da arte no desenvolvimento de sistemas remotos de sensores para estimar a umidade do solo, este estudo propõe um sistema com as seguintes características:

- a) estimar a umidade do solo, utilizando o método capacitivo de alta frequência, em diferentes profundidades simultaneamente;
- b) possibilitar ao usuário configurar tanto a profundidade total quanto o intervalo de profundidade de monitoramento;

- c) autonomia energética; todo o sistema é alimentado por painéis fotovoltaicos e bateria (*Off-Grid*);
- d) transmissão de dados de umidade utilizando a tecnologia de comunicação LoRa;
- e) armazenamento de dados em nuvem, permitindo o monitoramento em tempo real (online).

O objetivo deste trabalho é apresentar um protótipo sem fio para estimar a umidade do solo, bem como avaliar sua acurácia e desempenho em condições de laboratório e de campo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Composição da Fase Sólida do Solo

O solo é considerado um sistema trifásico uma vez que apresenta uma fase sólida (partículas de natureza mineral e orgânica), líquida (água líquida e vapor com solutos dissolvidos) e gasosa (ar do solo). Basicamente, o arranjo da fase sólida (estrutura do solo) é o que define a presença e as proporções relativas das outras fases (líquida e gasosa) e suas respectivas proporções no solo. As partículas orgânicas são formadas a partir de diferentes processos de decomposição e de transformações físicas e químicas de restos vegetais e animais depositados no solo. Essas partículas orgânicas (de variado tamanho e complexidade molecular) são materiais não cristalinos (amorfo), não existindo uma periodicidade em sua estrutura cristalina. As partículas orgânicas têm como elementos principais o carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, fósforo e enxofre, todos eles provenientes de resíduos vegetais e animais, biomassa microbiana e húmus (macromoléculas mais estáveis no solo). A matéria orgânica no solo possui diversas funcionalidades, tais como: fonte de nutrientes para as plantas, agente estabilizador dos agregados, retenção de água, além de fonte de energia para a vida no solo (BRADY; WEIL, 2009).

As partículas de natureza mineral são formadas a partir da decomposição e transformação do material de origem (rochas e sedimentos) e apresentam estruturas cristalinas, ou seja, os átomos se rearranjam geometricamente, formando uma estrutura tridimensional periódica ao longo de uma sequência.

Existem ainda os materiais não-cristalinos (amorfo), nesse caso, não existe uma periodicidade na estrutura cristalina. A fase mineral não silicatada compreende um grupo de moléculas onde em sua estrutura há ausência do átomo de silício (Si), dentre os quais destacam-se: os carbonatos como a dolomita (CaMgCO_3) e a calcita (CaCO_3), sulfatos como gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), óxidos de ferro (Fe_2O_3 - hematita) e alumínio (Al_2O_3), goethita (FeO(OH)), gibsitita (Al(OH)_3), e os haletos, onde o mais comum é o cloreto de sódio (NaCl).

Essas moléculas apresentam estrutura simples, com ligações entre os cátions e ânions. A fase mineral silicatada tem como unidade básica o tetraedro de silício (SiO_4^{4-}), ou seja, um arranjo estrutural onde o silício está coordenado a quatro átomos de oxigênio (Figura 1). A carga negativa na estrutura do tetraedro de silício pode ter a compensação eletrostática através de ligações com os íons positivos (cátions) presentes nos solos. Ademais, os pares de elétrons presentes no íon O^{2-} permitem que uma estrutura do tetraedro de silício estabeleça a união com outro tetraedro, formando estruturas mais complexas (MEURER, 2006).

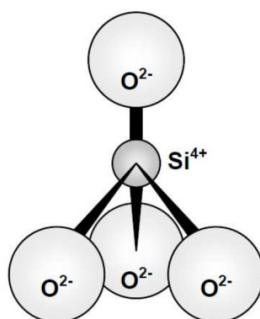


Figura 1. Tetraedro de silício. Fonte: Adaptado de Cresser; Killham; Edwards, 1993.

Os minerais silicatos podem apresentar arranjos estruturais distintos conforme a combinação (ou camadas) dos tetraedros de silício (Figura 2), formando assim outros tipos de minerais silicatados, alguns deles estão descritos na Tabela 1.

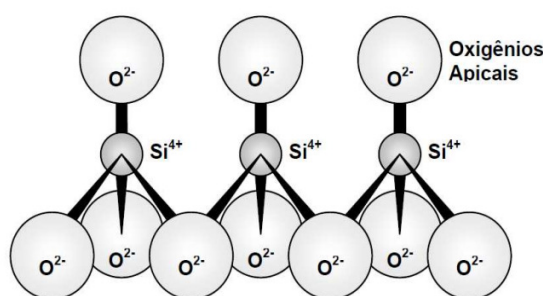


Figura 2. Combinação das estruturas de tetraedros de silício. Fonte: Adaptado de (CRESSER et al., 1993).

Tabela 1. Alguns minerais silicatados conforme arranjo estrutural.

Mineral	Tipo de Arranjo	Principal representante da classe
Nesosilicatos	Tetraedros de Silício isolados (sem compartilhamento do oxigênio com outros tetraedros)	Olivina (Mg,Fe) ₂ SiO ₄
Sorossilicatos	Grupos de tetraedros de silício duplos (compartilhamento do oxigênio apical)	Epidoto Ca ₂ (Al, Fe) ₃ (SiO ₄) ₃
Inossilicatos	Cadeias simples ou duplas com tetraedros de silício, os tetraedros são ligados pelo compartilhamento dos oxigênios com tetraedros adjacentes	Piroxênios LiAlSi ₂ O ₆ / CaMgSi ₂ O ₆
Ciclossilicatos	Se estruturam ao redor dos anéis de sílica, cada tetraedro de sílica compartilha dois oxigênios com o tetraedro vizinho	Benitoíte BaTiSi ₃ O ₉

Fonte: Adaptado de (MEURER, 2006).

Os filossilicatos pertencem aos minerais silicatados, entretanto, devido a ocorrência dominante na fração argila dos solos são conhecidos como argilominerais e apresentam camadas constituídas por lâminas de tetraédricas de silício (SiO₄)⁻⁴ e octaédricas de alumínio (AlO₄)⁻⁵. A estrutura básica do filossilicato (Figura 6), resulta entre a junção de tetraedros de silício e octaedro de alumínio pelos oxigênios apicais (Figura 5). O octaedro de alumínio apresenta excesso de carga negativa em sua estrutura, proveniente dos íons oxigênio podendo ser equilibrado eletrostaticamente caso o oxigênio ligue-se a dois íons de alumínio. Além disso, uma carga negativa que pode ser equilibrada com um íon hidrogênio dando origem a estrutura básica da gibbsita (Al(OH)₃) como apresentado na Figura 4. A fim de manter o equilíbrio de cargas na estrutura octaédrica, ao invés de utilizar íons hidrogênio, é realizada a sobreposição de uma estrutura tetraédrica de silício pelos íons apicais de oxigênio, conforme Figura 5, dando origem a estrutura básica da caulinita.

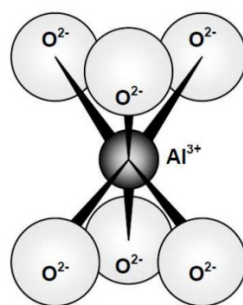


Figura 3. Estrutura de octaedro de alumínio e oxigênio. Fonte: (CRESSER et al., 1993).

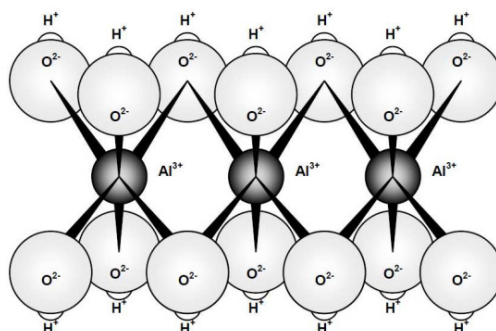


Figura 4. Estrutura básica para formação da gibbsita. Fonte: (CRESSER et al., 1993).

As ligações das lâminas tetraédricas de silício e octaédricas de alumínio podem formar dois tipos de estrutura básica do filossilicato. Assim sendo, quando as camadas são formadas por uma lâmina tetraédrica de silício e uma lâmina octaédrica de alumínio, tem-se um argilomineral denominado do tipo 1:1 (como exemplo, caulinita). No entanto, ao unir duas lâminas tetraédricas de silício e uma octaédrica de alumínio (Figura 6), há a formação de um argilomineral denominado do tipo 2:1 (como exemplo, montmorilonita). Essas ligações entre as camadas podem conferir a elas algum afastamento entre as mesmas, contudo, camadas com ligações muito fortes, impossibilita tal afastamento, constituindo os argilominerais não-expansivos. No entanto, quando as ligações das camadas não possuem tanta rigidez, torna-se possível um grau de afastamento entre elas, constituindo os argilominerais expansivos (CRESSER *et al.*, 1993).

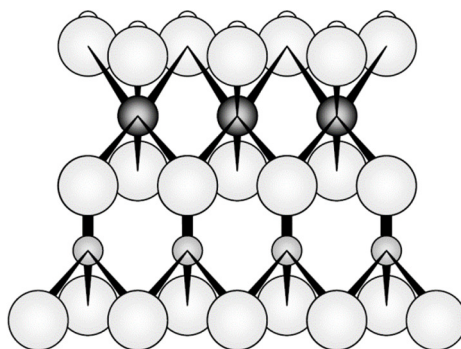


Figura 5. Estrutura básica para formação da caulinita. Fonte: (CRESSER et al., 1993).

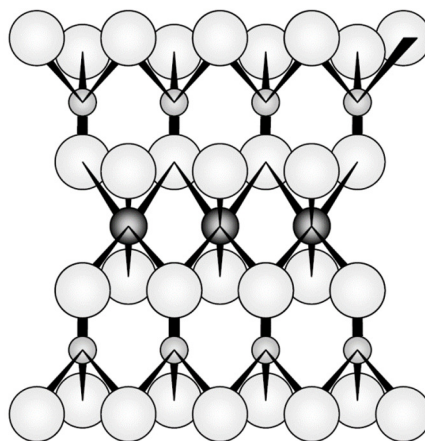


Figura 6. Estrutura básica do filossilicato do tipo 2:1. Fonte: (CRESSER et al., 1993).

A fração não silicatada, compreendida pelos óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos, também está presente na fração argila do solo. Nessa fração, os óxidos de ferro, alumínio, manganês e titânio são os mais frequentes, e seus teores variam de acordo com o grau de intemperismo e a concentração desses elementos no material de origem.

Quanto mais intemperizado o solo, maior a concentração desses óxidos, hidróxidos e oxihidróxidos (TAN, 2010). O íon ferro é um dos principais agentes corantes do solo e, dependendo de seu estado de oxirredução, confere cores vermelha, amarela, laranja (Fe^{+3} , óxidos com diferentes graus de hidratação) e cinza claro (Fe^{+2}). Dentre os óxidos de ferro mais abundantes estão a hematita (Fe_2O_3), goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) que conferem ao solo as cores vermelha e amarela respectivamente. Uma das características importantes desses óxidos é a carga variável (positiva ou negativa) dependendo do potencial de hidrogênio (pH) do solo, permitindo assim, a adsorção de cátions e ânions. As cargas presentes no solo influenciam diretamente os sensores de umidade que utilizam a permissividade elétrica para estimar o teor de água, uma vez que íons em altas concentrações na solução do solo, distribuídos de forma irregular, podem gerar correntes elétricas e, conseqüentemente, um campo elétrico. O surgimento desse campo elétrico afeta tanto o fluxo de água no solo quanto a interação com o campo eletromagnético gerado pelos sensores, podendo levar à superestimativa do teor de umidade.

2.2 Água no Solo

A água se destaca como um dos recursos naturais mais importantes, devido à sua essencialidade para a sobrevivência dos seres humanos, bem como para o desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, para a produção de alimentos. Entretanto, seu uso inadequado, associado ao desperdício, tem preocupado as autoridades ambientais (Fernandes, 2023). No que se refere ao solo, a água é tida como solução do solo devido a presença de sais dissolvidos. Na literatura o termo mais empregado é “água no solo”, portanto, ao longo do texto esse será o termo utilizado. A água do solo está presente em três formas: a) livre (água gravitacional); b) adsorvida nas partículas do solo (água higroscópica ou residual, não disponível à planta); c) água retida nos poros capilares. O teor de água no solo é um parâmetro que influencia as trocas gasosas, a temperatura e a resistência mecânica do solo. No entanto, esse teor está em constante mudança, devido à evapotranspiração, à irrigação, à percolação (movimento subterrâneo da água através do solo) e aos movimentos de redistribuição da água.

2.3 Retenção de Água no Solo

Pelo exposto no item 2.2, a água no solo está retida, basicamente, pelos fenômenos de adsorção e capilaridade. O movimento das moléculas de água no solo, tanto ascendente como descendente, depende de diversos fatores, como, diâmetro das partículas do solo, quantidade e distribuição de poros, variação de temperatura, das cargas elétricas (presente em diversas partículas do solo) e da própria umidade do solo (quanto maior a umidade, maior a condutividade hidráulica do solo). Para entender o fenômeno de retenção de água no solo é importante apresentar alguns atributos físico-químicos da água que interferem nesse processo. A molécula de água possui polaridade que contribui para tais movimentos. Essa polaridade se origina devido a ligação de dois átomos de hidrogênio (eletropositivo: δ^+) com um átomo de oxigênio (eletronegativo: δ^-) gerando uma molécula com cargas assimetricamente distribuídas (Figura 7).



Figura 7. (a) Polaridade e estrutura da molécula de água; (b) ligações intermoleculares da água com ponte de hidrogênio. Fonte: Adaptado de Lehninger; Nelson; Cox, 2013.

A polaridade da água explica a interação entre suas moléculas, na qual o oxigênio de uma molécula interage com o hidrogênio da molécula vizinha, formando agrupamentos em cadeia (polímeros) por meio de ligações de hidrogênio (ou pontes de hidrogênio). Essas interações conferem à água um alto ponto de ebulição e calor específico elevado quando comparados aos de outras moléculas de cadeia semelhante (MEURER, 2006).

A retenção de água nos solos está relacionada à polaridade da água. Assim, uma partícula do solo (superfícies coloidais) carregada positivamente atrai o oxigênio da molécula de água, enquanto uma partícula carregada negativamente atrai os hidrogênios. Existe uma relação direta entre as ligações de hidrogênio e as forças responsáveis pela movimentação e retenção da água no solo, sendo elas: Adesão: ligação entre superfícies de natureza diferente, como líquido e sólido; e coesão: ligação entre superfícies de mesma natureza, como sólido com sólido ou líquido com líquido.

No que diz respeito à adsorção (adesão da água às superfícies das partículas do solo), ela decorre da atração entre as moléculas de água e as superfícies das partículas carregadas, positiva ou negativamente. Por outro lado, a coesão refere-se à atração entre as próprias moléculas de água, que mudam de forma e posição à medida que se unem ou se separam. Dessa forma, as moléculas de água retidas por adsorção podem, por meio da coesão, reter outras moléculas mesmo à distância da superfície da partícula do solo. A contribuição dessas forças é fundamental para a retenção de água nos solos (LIBARDI, 2005). Assim, mesmo com a retenção da água no solo por adsorção e coesão, a água ainda possui uma organização espacial aleatória, que pode ser afetada quando um campo elétrico externo é aplicado. Contudo, em frequências baixas (em torno de quilohertz – kHz), as moléculas de água conseguem retornar ao seu estado fundamental de organização, o que aumenta a permissividade aparente do solo.

Em altas frequências (megahertz – MHz e gigahertz – GHz), as moléculas não conseguem retornar ao estado fundamental devido às rápidas variações do campo aplicado, diminuindo a permissividade aparente e podendo ocasionar uma subestimativa do teor de umidade do solo pelos sensores (SZYPLÓWSKA et al., 2019).

2.4 Tensão Superficial e Capilaridade

A retenção de água no solo está diretamente associada à polaridade da molécula de água. Entretanto, há outros fenômenos que contribuem para essa retenção, tais como a tensão superficial e a capilaridade. Quando há uma interface da água com o ar, ocorre que as moléculas de água que estão no interior (abaixo da superfície) são atraídas umas pelas outras em todas as direções (força molecular de London–van der Waals) (MEURER, 2006). Já as moléculas de água presentes na superfície são atraídas para o interior de maneira mais intensa em relação às moléculas contidas no ar, ocasionando uma contração espontânea da superfície, conhecida como tensão superficial.

A capilaridade é um fenômeno associado à tensão superficial, no qual é possível a ascensão ou depressão de líquidos em contato com uma superfície sólida, levando em consideração as propriedades de coesão do líquido e produzindo uma curvatura na superfície (menisco). Os solos possuem poros de diversos tamanhos e, quando úmidos, a água fica retida pelo fenômeno da capilaridade. Todavia, quando o solo se torna mais seco, os poros esvaziam, ocorrendo filmes de água que recobrem as partículas sólidas, e o fenômeno da adsorção torna-se evidente, tornando a remoção de água mais custosa em termos de energia (BODUROGLU; BASHIR, 2022). Comumente, a capilaridade é apresentada de forma ascendente. Contudo, o fluxo de água pode ocorrer em quaisquer direções, dependendo da atração entre os poros do solo e a água. A velocidade do movimento de ascensão, por sua vez, varia conforme o tamanho dos poros e a quantidade de ar contida neles.

2.5 Energia da Água no Solo

A energia está presente em diversos corpos e é comumente usada na ciência para designar a capacidade de realizar trabalho ou de provocar uma ação (WALKER et al., 2014). A energia cinética está associada ao movimento da matéria em relação a um determinado referencial, enquanto a energia potencial está relacionada à posição de um corpo em relação a um campo de forças. A água se move lentamente pelos poros do solo, de modo que a energia cinética pode ser desconsiderada quando comparada à energia potencial. Assim, como toda matéria na natureza, a água busca o equilíbrio energético, movendo-se de regiões de maior energia para regiões de menor energia, tendendo ao equilíbrio (LIBARDI, 2005). A energia em determinado local está atrelada a fatores como capilaridade, adsorção, íons em solução e a gravidade, onde para cada fator haverá um potencial envolvido, que será descrito na Seção 2.6.

2.6 Potencial Total da Água no Solo

Por via de regra, o estado de energia da água em uma localidade do solo (ξ) é correlacionada à água pura mantendo constante a temperatura e a pressão, sem influência dos sais e localizada a uma altura que corresponderá à referência (água no estado padrão, ξ_0). Portanto, o potencial total da água no solo se dá pela diferença entre água em uma localidade do solo com a água no estado padrão ($\xi - \xi_0$) e pode ser expressa por unidade de massa, volume e peso. O potencial da água sofre influência direta de diversas forças, onde cada uma delas corresponderá a um potencial específico originários dos diferentes níveis de energia. Esses potenciais contribuem diretamente para o comportamento/movimento da água no solo e o seu

somatório corresponde ao potencial total da água (Ψ_T), dentre os potenciais tem-se: o gravitacional, pressão, mátrico e o osmótico (OSMAN, 2013).

2.6.1 Potencial gravitacional

Segundo a mecânica moderna, todo corpo sofre ação direta da gravidade (atração gravitacional) em direção ao centro da Terra (WALKER, 2012), e esse potencial gravitacional é medido em relação a uma referência arbitrária (referência gravitacional), onde deve-se imaginar localizada a superfície plana do estado padrão da água do solo (ξ_0). Como a água no solo está submetida a ação do campo gravitacional terrestre, o fenômeno pode ser representado pela Equação 1.

$$\Psi_g = m_a g (r - r_0) \quad (1)$$

sendo m_a = massa de água no solo (g); g = gravidade (m/s); r = distância do centro da Terra ao ponto considerado no ponto específico do solo (m); r_0 = distância do centro da Terra a referência gravitacional (m). O incremento do potencial gravitacional será dado quando a massa de água se desloca da posição r para r_0 , podendo ser contra ou a favor da gravidade.

2.6.2 Potencial pressão

A pressão hidrostática trata da relação estática das forças que um fluido produz levando em consideração a sua densidade, altura do ponto onde está exercendo a pressão, e a aceleração da gravidade (WALKER, 2012). A ação do potencial de pressão (Ψ_p) surge da pressão hidrostática, ou seja, o potencial de pressão em um ponto específico do solo é igual à pressão de água exercida no referido ponto. Além disso, esse potencial está condicionado a solos saturados onde a ação das forças de coesão supera as forças de adsorção e capilaridade. A Equação 2 expressa o potencial de pressão da água (Ψ_p) em solos saturados.

$$\Psi_p = \rho_a g h \quad (2)$$

Tem-se na Equação 2: ρ_a = massa específica da água (kg/m^3); g = gravidade (m/s); e h = profundidade da coluna água em um ponto específico (m), e sua unidade no sistema internacional (SI) é dada em Pascal (Pa).

2.6.3 Potencial mátrico

A água no solo pode ser retida (sucção) por meio dos fenômenos da adsorção e da capilaridade. Esses fenômenos se manifestam devido à matriz do solo e apresentam forças, chamadas de forças mátricas, cuja intensidade aumenta à medida que o solo reduz sua umidade. A força advinda da capilaridade retém a água nos poros capilares, enquanto a força de adsorção é responsável por reter a água nas superfícies das partículas do solo. A combinação dessas forças determina o potencial mátrico (Ψ_m). A água no solo sob efeito da capilaridade e da adsorção em solos insaturados diminui sua energia livre, tornando-se inferior a energia livre da água no estado padrão (ξ_0). Devido a isso, o potencial mátrico terá sempre um valor negativo conforme a Equação 3.

$$\Psi_m = -\Psi_p \quad (3)$$

Na Equação 3, pode-se observar que o potencial mátrico possui valor negativo do potencial de pressão. Isso ocorre, pois o potencial total específico da água (em uma determinada posição do solo) possui o mesmo valor do potencial específico de pressão da água livre (padrão) representando assim a energia de retenção de água no solo (LIBARDI, 2005).

2.6.4 Potencial osmótico

A solução do solo é capaz de reduzir a energia potencial da água livre, uma vez que as moléculas de água são atraídas pelos íons presentes na solução. Esse efeito provoca uma redução na movimentação das moléculas de água, ao mesmo tempo em que elas se agrupam em torno dos íons em solução (SHUKLA, 2013). Devido à osmose, um solvente puro (por exemplo, água pura) move-se em direção a uma solução através de uma membrana semipermeável, a pressão a ser aplicada de modo a evitar a osmose do componente de água é conhecida como potencial osmótico (Ψ_o) e é apresentado na Equação 4.

$$\Psi_o = -RTC \quad (4)$$

sendo R = constante universal dos gases, T = temperatura e C = concentração molar dos solutos.

2.7 Movimento de Água no Solo

A água, ao fluir no solo, percorre diversos caminhos entre os poros devido à diferença de potencial hídrico. Ela se movimenta do maior para o menor potencial hídrico e, mesmo sob a ação da gravidade, pode realizar movimentos descendentes e ascendentes. Dessa forma, diversos fatores influem diretamente na dinâmica do movimento da água no solo, podendo-se citar as forças de adsorção e coesão, o teor de matéria orgânica, a condutividade hidráulica do solo (k), entre outros. A condutividade hidráulica é um coeficiente que expressa a facilidade de transmissão da água no solo, sendo seu valor dependente da quantidade e distribuição de poros, da textura, do teor de matéria orgânica, da estrutura, da tortuosidade dos poros e da própria umidade do solo (solos úmidos conduzem mais água). Já as forças (potenciais) que movem a água através do solo ficam expressas no gradiente hidráulico ($\Delta\Psi(t) / \Delta Z$). A relação entre condutividade hidráulica e o gradiente hidráulico, está diretamente ligado a densidade de fluxo de água no solo, que é uma grandeza para expressar o volume de água que atravessa uma seção transversal (área de solo) por unidade de tempo (BRADY; WEIL, 2009). O maior detalhamento sobre fluxo de água no solo é apresentado nas Seções 2.7.1 e 2.7.2.

2.7.1 Movimento da água em solos saturados

A densidade de fluxo de água (q) foi formulada em 1856, pelo engenheiro hidráulico Henry Darcy, que propôs uma equação para o fluxo de água em solos saturados, onde levou-se em consideração a condutividade hidráulica na condição de solo saturado (k_{sat}) e o gradiente hidráulico (DARCY, 1856). Logo, em condição de saturação, os potenciais que contribuem com o gradiente hidráulico são os potenciais de pressão e gravitacional. A formulação proposta do Darcy é apresentada na Equação 5.

$$q = -k_{sat} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (5)$$

Observando a Equação 5, tem-se: q = densidade de fluxo de água (cm/s); k_{sat} = condutividade hidráulica em solos saturados (cm/s), e $\frac{\partial h}{\partial z}$ = gradiente hidráulico total (potencial total da água Ψ_t) entre dois pontos. O gradiente hidráulico refere-se à força motriz do fluxo, uma vez que o movimento de água se dá somente quando existe diferença de potencial total da água entre dois pontos sob análise. No caso do fluxo saturado Ψ_t é produto do somatório dos potenciais de pressão (Ψ_p) e potencial gravitacional $\Psi_t = \Psi_p + \Psi_g$. O gradiente hidráulico é constante em solos saturados e, também, pode ser definido como a taxa de perda de carga hidráulica por unidade de distância que a água percorre de um ponto para outro do solo.

2.7.2 Movimento da água em solo não saturado

Como a equação de Darcy é aplicada a solos saturados, Edgar Buckingham (BUCKINGHAM, 1907), propôs uma formulação para solo não saturado, e observou que o potencial matricial (Ψ_m) e a condutividade hidráulica são funções da umidade do solo. Nesse contexto, a formulação conhecida como Darcy-Buckingham descreve a densidade de fluxo conforme a Equação 6.

$$q = -k(\theta) \frac{\partial \Psi(\theta)}{\partial z} \quad (6)$$

Quando o solo não está saturado e não havendo uma membrana semipermeável, os potenciais de pressão (Ψ_p) e osmótico (Ψ_o) são nulos. Assim sendo, o valor do potencial total da água do solo em cada ponto sob análise é produto do somatório dos potenciais mátrico (dependente da umidade - $\Psi_m(\theta)$) e o gravitacional (Ψ_g). Tem-se então que: $\Psi_t = \Psi_m(\theta) + \Psi_g$. A formulação final da equação de fluxo insaturado de Darcy-Buckingham é apresentada na Equação 7.

$$q = -k(\theta) \left[\frac{\partial \Psi_g}{\partial z} + \frac{\partial \Psi_m(\theta)}{\partial z} \right] \quad (7)$$

As Equações 6 e 7 levam em consideração o fluxo como estacionário, logo, não varia com o tempo. Já a equação de Richards para fluxo unidimensional de água no solo, é a combinação da equação de Darcy-Buckingham com a equação da continuidade fornecendo assim, uma equação diferencial (Equação 8) que rege o movimento da água no solo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[k(\theta) \left(\frac{\partial \Psi_g}{\partial z} + \left(\frac{\partial \Psi_m(\theta)}{\partial z} \right) \right) \right] \quad (8)$$

Assim, com o monitoramento da estimativa da umidade do solo em tempo real utilizando a sonda proposta nesse trabalho, é possível caracterizar a infiltração da água em solos insaturados, além de obter o potencial matricial e a condutividade hidráulica uma vez que ambos podem ser derivados a partir dos dados da umidade e de uma curva de retenção de água no solo.

2.8 Conceitos Básicos de Eletromagnetismo

Para melhor compreensão do princípio de funcionamento da sonda segmentada proposta neste trabalho, é necessário abordar alguns conceitos fundamentais de eletromagnetismo, além da simulação computacional de um segmento da sonda e da placa de aquisição dos valores de capacitância. Entre os conceitos abordados estão: carga elétrica e Lei de Coulomb, condutores e isolantes, corrente elétrica, tensão elétrica, campos elétricos e intensidade dos campos elétricos, capacitância e dielétrico. Com base nesses conceitos da física clássica, é possível correlacioná-los ao surgimento e aos efeitos de cada um deles nos solos. Dessa forma, surgem algumas questões, como, por exemplo: como as cargas elétricas estão presentes nos solos? Qual é o efeito do dielétrico na umidade do solo? O solo é um bom condutor de eletricidade? Entre outras. No decorrer do texto, essas perguntas serão abordadas de forma concatenada.

2.8.1 Carga elétrica e Lei de Coulomb

Toda matéria é composta por partículas, as quais possuem, como propriedade intrínseca, carga elétrica. Um objeto é considerado eletricamente neutro quando o número de cargas positivas e negativas é equivalente, ou seja, quando sua carga total é igual a zero. Quando há um desequilíbrio dessa carga (carga total diferente de zero), diz-se que o objeto está eletricamente carregado. Os objetos eletricamente carregados interagem entre si por meio de uma força determinada: se dois objetos possuem a mesma polaridade (positiva ou negativa), eles se repelem; se possuem polaridades opostas, eles se atraem. Essa força de repulsão ou atração é chamada força eletrostática (ou força elétrica), também conhecida como a primeira lei de Coulomb (Halliday, 2014). A força elétrica, e pode ser expressa como apresentado na Equação 9.

$$F_e = K \frac{Q_1 \cdot Q_2}{(D_p)^2} \quad (9)$$

onde Q_1 e Q_2 são as quantidades de cargas positivas ou negativas, D_p é a distância entre as cargas e K é a constante de proporcionalidade. Pelo sistema internacional de Unidades (SI), as cargas são dadas em Coulomb (C), a distância entre as placas D_p em metros (m), e a força em Newtons (N). A constante de proporcionalidade (K) é expressa pela Equação 10.

$$K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \quad (10)$$

A constante ϵ_0 é chamada de permissividade do espaço livre, e possui valor medido em Farads por metro (F/m), e é dada pela Equação 11:

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} 10^{-9} F/m \quad (11)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (10), tem-se a Lei de Coulomb sendo expressa na Equação 12.

$$Fe = \frac{Q1.Q2}{4\pi \epsilon_0 (Dp)^2} \quad (12)$$

2.8.2 Cargas elétricas no solo

Os colóides presentes no solo incluem partículas orgânicas humificadas, minerais (argilominerais e óxidos) e compostos organominerais, ou seja, a combinação de argilominerais, óxidos e húmus. Entre as características dessas partículas destacam-se a elevada superfície específica e a presença de cargas na superfície (positivas e negativas). Essas propriedades permitem que os colóides interajam com as moléculas de água, atuem como agentes cimentantes na formação de agregados e contribuam para a capacidade do solo de reter íons (MEURER, 2006). As cargas elétricas no solo podem surgir da substituição isomórfica, se por acaso no momento de síntese do mineral octaédrico (Figura 4) o íon central trivalente (Al^{+3}) for substituído por um íon divalente (Fe^{+2}) promoverá um desequilíbrio de carga tornado a estrutura do mineral negativamente carregada. A estrutura tetraédrica, também está sujeita a substituição isomórfica, pois caso, o alumínio trivalente (Al^{+3}) substituir o silício (Si^{+4}) isso provocará o surgimento de carga negativa (SPOSITO, 2008). Como as substituições isomórficas ocorrem na formação do mineral, são consideradas cargas permanentes. Todavia, as arestas dos minerais que possuem íons oxigênio não estão totalmente equilibradas, podendo atrair um íon hidrônio (H_3O^+) da solução do solo para atingir o equilíbrio, porém, isso dependerá da concentração de íons hidrônio em solução, ou seja, do pH do solo. Dessa forma, essas cargas são denominadas dependentes de pH ou variáveis (SPARKS *et al.*, 2022).

No contexto das cargas geradas em função do pH ou da substituição isomórfica, ambas podem estabelecer a capacidade de um determinado solo em reter espécies iônicas presentes em solução. A capacidade de troca de cátions (CTC) está relacionada ao poder de adsorção e da troca propriamente dita de cátions, representando de forma indireta a quantidade de carga negativas no solo (TAN, 2010). Vários são os fatores que afetam a CTC, tal como, pH do solo, teor de matéria orgânica, quantidades e tipo de argilominerais, e pôr fim a adsorção específica. Ou seja, a força elétrica gerada no solo é consequência desses mecanismos de geração de cargas nos colóides e substituição isomórfica.

2.8.3 Condutores e isolantes

Há materiais nos quais as cargas elétricas circulam com facilidade, como é o caso dos metais, do corpo humano e da água. Esses materiais são chamados de condutores. Por outro lado, os materiais em que a movimentação das cargas elétricas é dificultada, como plásticos, madeira, borracha e vidro, são chamados de não condutores (ou isolantes). Existe ainda uma classe de materiais com propriedades elétricas intermediárias, denominados semicondutores, utilizados em microcircuitos e chips presentes em diversos componentes eletrônicos, como o silício (Si) e o germânio (Ge). O solo, em seu estado natural, isto é, totalmente seco, comporta-se como um material isolante, sendo um mau condutor de eletricidade, e sua resistividade torna-se muito elevada quando comparada à de outros materiais condutores convencionais (FILHO, 2002), (Tabela 2).

Tabela 2. Resistividade aproximada de alguns materiais condutores.

Condutor	Resistividade ($\Omega.m$)
Cobre puro	$1,6 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,7 \times 10^{-8}$
Ferro	$10,3 \times 10^{-8}$
Ouro	$2,4 \times 10^{-8}$
Solos mais comuns	5 a 20.000
Argilas	80 a 330
Areia	3.000 a 8.000
Húmus	10 a 150

Fonte: Adaptado de Filho, 2002.

2.8.4 Condutividade elétrica e resistividade do solo

A condutividade elétrica (*EC*, do inglês *Electrical Conductivity*) diz respeito à capacidade de um material conduzir (transmitir) cargas elétricas (elétrons ou íons) através de um sistema, e a sua unidade se dá em miliSiemens por metro (mS/m) ou, em alguns casos, microSiemens por metro ($\mu S/m$). Nesse sentido, quanto mais íons disponíveis, maior a condutividade. Consequentemente, uma diminuição dessa disponibilidade resultaria em uma diminuição da condutividade. A condução elétrica no solo depende dos sais presentes em solução e/ou dos íons trocáveis que se encontram nas superfícies das partículas sólidas (por exemplo, cátions trocáveis K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). A condutividade elétrica aparente do solo (*E_{Ca}*, do inglês *Apparent Electrical Conductivity*) representa a medição da condutividade total, ou seja, da condutividade elétrica do solo considerado como um sistema trifásico (sólido, líquido e gasoso). A condutividade elétrica do solo está associada aos atributos físicos e químicos, uma vez que a condução de corrente elétrica depende da salinidade, da matéria orgânica, da textura, da umidade e da distribuição/tamanho dos poros (ALLRED, 2008). Dessa forma, a condutividade elétrica do solo é frequentemente utilizada para delimitar regiões em que os solos apresentam características semelhantes, como na agricultura de precisão.

O método mais comum de medição da condutividade elétrica do solo é aquele baseado na resistividade elétrica, por meio da qual se utiliza a primeira lei de Ohm, que relaciona o fluxo de corrente elétrica (Seção 2.8.5) em pontos onde há diferença de potencial elétrico (Seção 2.8.6), sendo esse fluxo dependente da resistividade do solo. Assim, solos com alta resistividade terão baixo fluxo de elétrons e, consequentemente, baixa condutividade elétrica. De forma inversa, em solos com baixa resistividade ocorre um aumento no fluxo de corrente elétrica e, portanto, na condutividade elétrica. Nesse caso, a primeira lei de Ohm estabelece que, ao se aplicar uma diferença de potencial elétrico em um condutor, ocorre o surgimento de uma corrente elétrica diretamente proporcional ao potencial aplicado e inversamente proporcional à resistência elétrica. Essa definição pode ser expressa na Equação (13).

$$V = RI \quad (13)$$

Dessa maneira, se o condutor apresentar uma alta resistência elétrica haverá uma diminuição da corrente para um mesmo potencial. Para a Equação 13, tem-se:

V – Potencial Elétrico, sendo expresso em Volts (V);

R – Resistência elétrica, em Ohms (Ω);

I – Corrente elétrica, em Ampères (A).

A Resistência elétrica (R) é uma propriedade do condutor, sendo assim, é dependente do comprimento, da espessura e do tipo de material que esse condutor é feito. Entretanto, a resistividade elétrica é uma propriedade específica do material e dependente das características microscópicas intrínsecas (BOYLESTAD, 2012), e pode ser expresso pela Equação 14.

$$\rho = \frac{R \cdot A'}{l} \quad (14)$$

Onde:

ρ – Resistividade Elétrica, expressa em ($\Omega \cdot m$);

R – Resistência Elétrica (Ω);

A' – Área do condutor (m^2);

l – Comprimento (m).

Assim como em um condutor elétrico, os solos apresentam características intrínsecas que fazem com que a resistividade elétrica aumente ou diminua. Além disso, existe uma relação inversa entre a resistividade e a condutividade elétrica do solo. Um solo com elevada condutividade elétrica (seja devido à umidade ou à presença de íons em solução) tende a apresentar baixa resistividade. Os metais contidos nos solos estão na forma de íons, e, com a umidade presente, forma-se uma solução que tem potencial para conduzir corrente elétrica. Alguns solos conduzem mais eletricidade que outros (variação de resistividade/condutividade), e isso se deve à matriz do solo, que pode conter maior proporção de minerais, sais condutores e água. Dessa forma, quanto maior a umidade do solo, maior será a condutividade, uma vez que a água — especialmente quando contém sais dissolvidos — favorece o transporte de cargas elétricas. Pode-se, assim, afirmar que solos úmidos apresentam condutividade elétrica superior à de solos secos, àqueles que não retêm água, como os muito arenosos, e aos solos congelados, pois a estrutura cristalina do gelo apresenta alta resistividade elétrica.

Como citado anteriormente, alguns solos podem apresentar condutividades diferentes e isso é consequência de diversos fatores, como umidade, textura, capacidade de troca de cátions, dentre outros (CORWIN; LESCH, 2005). Como dito, cátions são formas químicas dos elementos carregados positivamente, e algumas espécies de cátions são comuns nos solos, dentre eles, o Magnésio (Mg^{+2}), potássio (K^{+1}), cálcio (Ca^{+2}) e o sódio (Na^{+1}). Devido a isso, um solo com alta CTC tende a apresentar elevada condutividade elétrica. A granulometria é outro atributo diretamente relacionado à resistividade do solo, uma vez que, dependendo do diâmetro das partículas e do grau de agregação, pode ocorrer maior retenção de água nos microporos, o que reduz a resistividade. Isso ocorre porque a água é condutora de eletricidade e esses microporos proporcionam maior continuidade à massa do solo. Todavia, no caso dos macroporos, haverá menor retenção de água, permitindo um fluxo maior para as camadas mais profundas e, consequentemente, o aumento da resistividade elétrica. Da mesma forma que o diâmetro das partículas e a agregação do solo influenciam sua resistividade e condutividade, a temperatura desempenha papel semelhante. O aumento da temperatura faz com que o solo perca água, reduzindo sua umidade e, consequentemente, diminuindo a condutividade e elevando a resistividade elétrica. (FILHO, 2002).

2.8.5 Corrente elétrica e corrente elétrica no solo

A corrente elétrica pode ser definida como a taxa de variação da carga elétrica no tempo que passa por um ponto ou em uma determinada região do espaço. Sua expressão matemática é dada pela Equação 15.

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (15)$$

onde i é a corrente elétrica (em ampères, A) e a dq é a quantidade de carga (em coulombs) que passa por um ponto no intervalo de tempo dt (dado em segundos).

Íons em solução permitem a condução de corrente elétrica. Assim, solos com alta concentração de sais solúveis terão facilidade no fluxo de eletricidade (corrente elétrica), ou seja, uma diferença de potencial elétrico em virtude da diferença de concentração desses íons. Uma prática comum para estimar a corrente elétrica do solo é através da condutividade elétrica.

2.8.6. Potencial elétrico (tensão elétrica) e potencial elétrico no solo

Potencial elétrico ou tensão elétrica é a quantidade de energia necessária para mover uma carga elétrica unitária entre dois pontos distintos de uma região dotada de um campo elétrico. O potencial elétrico é uma grandeza física escalar medida em volts (V), que equivale a joules por coulomb (J/C) em unidades SI (BOYLESTAD, 2012). Os solos podem apresentar concentrações irregulares de íons (cátions e ânions) em determinadas regiões e profundidades, logo, o potencial elétrico do solo está atrelado a essas concentrações. As concentrações irregulares (com cargas positivas e negativas em desequilíbrio) permitem a movimentação de carga elétrica, de uma região de maior concentração para uma região de menor concentração.

2.9 Campo Elétrico (E) e Intensidade do Campo Elétrico

O Campo Elétrico (E) é uma distribuição vetorial que surge a partir de uma determinada região em torno de um objeto carregado eletricamente. Ele é definido como sendo a divisão entre a força elétrica (F) e a carga (q_0), sua expressão está representada na Equação 16.

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (16)$$

A unidade do Campo Elétrico no SI é Newton por Coulomb (N/C). As linhas de campo elétrico surgem da atração ou repulsão das cargas a partir dos campos elétricos produzidos pelas cargas envolvidas. Dessa forma, as linhas de campos se afastam das cargas positivas (de onde há o surgimento das linhas) e se aproximam das cargas negativas (onde as linhas terminam) (WALKER et al., 2014). Na Figura 8, é possível observar as linhas de campo que surgem a partir de duas cargas positivas (repulsão); já na Figura 9, tem-se a linha de campo entre duas partículas com cargas opostas.

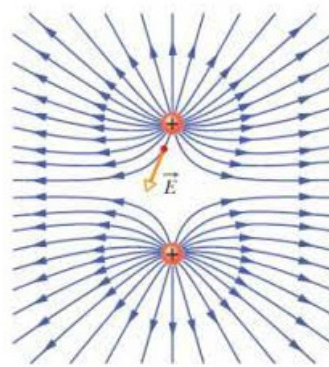


Figura 8. Linhas de campo entre duas partículas carregadas positivamente onde se tem a repulsão das linhas. Fonte: (WALKER *et al.*, 2014).

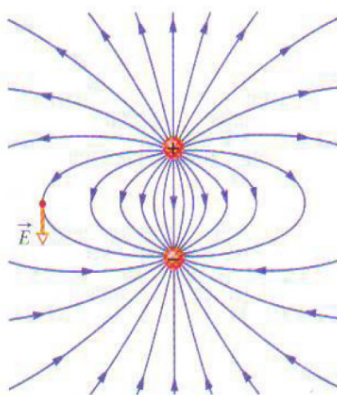


Figura 9. Linhas de campo entre duas partículas carregadas sendo uma positivamente e outra negativamente, tem-se a atração das linhas. Fonte: (WALKER *et al.*, 2014).

2.9.1 Campo elétrico no solo

Há dois fatores primordiais para o surgimento do campo elétrico e para a determinação de sua intensidade no solo. São eles: a) a composição dos eletrólitos; e b) a concentração desses eletrólitos no solo. As partículas presentes no solo, sejam de origem orgânica ou inorgânica, apresentam cargas elétricas. Por exemplo, o húmus apresenta uma densidade de carga superficial de aproximadamente $0,8 \text{ C/m}^2$, que equivale a um campo elétrico de $1 \times 10^9 \text{ V/m}$. Uma partícula de argila possui densidade de carga próxima de $0,3 \text{ C/m}^2$, correspondente a um campo elétrico de $4 \times 10^8 \text{ V/m}$. Ademais, os íons presentes no solo também podem gerar campos elétricos, segundo (YU *et al.*, 2016), que demonstraram a influência das cargas iônicas na intensidade do campo elétrico do solo.

Esses campos afetam diretamente o movimento da água no solo. Em virtude das forças eletrostáticas entre o campo elétrico e o dipolo das moléculas de água, pode ocorrer a desestabilização dos agregados do solo. Nesse contexto, há outros trabalhos que apresentam as forças envolvidas na movimentação da água, sendo elas: a força de hidratação na superfície, pois essa força pode causar a expansão dos agregados “secos”, porém sem provocar quebras (SUITS *et al.*, 2011). A força repulsiva eletrostática, principalmente entre as partículas de argila, pode causar a quebra dos agregados, alterando, assim, a geometria dos poros do solo. Logo, devido à ocorrência dessas forças, é possível observar uma influência direta na estabilização dos agregados e, conseqüentemente, no movimento da água no solo, por meio do potencial mátrico decorrente da presença de capilares, além do efeito gravitacional (HU *et al.*, 2015).

2.9.2 Capacitância

A capacitância mede a capacidade de armazenamento de energia, podendo estar presente em um dispositivo elétrico ou em um equipamento. O capacitor é um dispositivo que armazena essa energia por meio de seu campo elétrico, enquanto o indutor a armazena em seu campo magnético (indutância). Assim, quanto maior a capacitância de um capacitor, maior será a quantidade de energia que ele poderá armazenar quando submetido à mesma tensão (BOYLESTAD, 2012). A capacitância (C) é uma função que leva em consideração apenas as dimensões físicas do sistema de condutores e da permissividade do dielétrico homogêneo (ou simplesmente dielétrico), e sua unidade é dada em Farads (F). Como os valores de capacitância são frações pequenas, é comum utilizar unidades como microfarad (μF), nanofarad (nF) e picofarad (pF). Assim, a capacitância pode ser expressa conforme a Equação (17), e sua relação com a tensão elétrica aplicada sobre os condutores (V) e a carga (q) nele presente são expressas na Equação (18).

$$C = \epsilon \frac{A'}{D'} \quad (17)$$

C é a capacitância (F), A' representa a área do condutor (m^2), D' a distância entre os condutores (m) e ϵ a permissividade (F/m). Conforme a Equação (17), a capacitância é inversamente proporcional à distância entre os condutores e diretamente proporcional à área do condutor. Logo, para que haja uma variação dos valores de capacitância, é necessário mudar a área do condutor, a distância entre eles ou a permissividade do meio.

$$C = \frac{q}{V} \quad (18)$$

A sonda proposta neste trabalho possui condutores com área e distância fixas; portanto, a capacitância varia em função da permissividade (ϵ). O solo, enquanto dielétrico, apresenta variações de permissividade dependendo da umidade, pois, por ser um sistema trifásico, configura-se como um dielétrico composto: parte sólida (partículas), ar (ocupando os poros não capilares) e solução do solo. Como a umidade corresponde à fração de solução do solo (água), tanto a variação da umidade quanto a presença de sais no solo provocam alterações no valor da capacitância.

Assim, essas variações de capacitância são processadas em um circuito eletrônico, no qual é realizada a conversão dos valores de capacitância em sinais elétricos padronizados, que são, em seguida, enviados ao microprocessador. Este se encarrega do condicionamento do sinal e de transmiti-lo sem fio a um centralizador.

2.9.3 Dielétrico

O espaçamento entre os condutores que compõem um capacitor pode ser preenchido por diversos materiais, conhecidos como dielétricos (“di”, que significa oposição, e “elétrico”, referente ao campo elétrico), segundo (BOYLESTAD, 2012). Dentre os materiais, o ar, utilizado como referência, possui valor de permissividade relativa (ϵ_r) igual a 1. O termo “permissividade” refere-se à facilidade com que um material permite o estabelecimento de um campo elétrico em seu interior. Há uma relação entre os materiais dielétricos, denominada permissividade relativa (ϵ_r) ou constante dielétrica. A ϵ_r é calculada a partir da permissividade

do material (ϵ) dividido pela permissividade do ar (ϵ_0), sendo a permissividade relativa adimensional, conforme expressa na Equação (19). Por exemplo, a borracha possui permissividade relativa aproximada de 3, o que significa que o estabelecimento de um campo elétrico em seu interior é aproximadamente três vezes mais difícil do que no ar (Tabela 3). Já a água presente no solo apresenta diferentes valores de permissividade — variando de 5 a 10 até 80 a 81 — e pode sofrer alterações conforme outros atributos do solo, como a salinidade.

No que se refere ao solo, cabe ressaltar que, enquanto dielétrico, seu valor varia não apenas em função da umidade, mas também da salinidade e da mineralogia. Quando campos elétricos e magnéticos atravessam materiais porosos, ocorre dispersão ou até mesmo perda de energia do dielétrico. Essa dispersão é causada pela polarização ou relaxamento das moléculas polares (como a água) presentes nesses materiais em função do campo aplicado, gerando um atraso entre o campo incidente e a resposta do material.

Além disso, as cargas elétricas e a condutividade elétrica presentes na solução do solo (eletrólitos dissolvidos) também provocam dissipação de energia. Consequentemente, as superfícies dos materiais coloidais do solo ficam carregadas eletricamente, podendo apresentar excesso ou déficit de cargas. Em relação à salinidade, os sais presentes nos solos podem provocar dispersão nos sinais emitidos pelos sensores, reduzindo, assim, a propagação do campo eletromagnético (TOPP *et al.*, 2000). Como os sensores do tipo FDRs são do tipo capacitivo, assim no trabalho de (INOUE *et al.*, 2008) foi observado que os FDR apresentam maior sensibilidade a salinidade quando comparados com os sensores do tipo TDR.

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (19)$$

Alguns trabalhos relatam a mudança do dielétrico em virtude do contato da água com partículas coloidais como argila e matéria orgânica. Por exemplo em (SANTOS *et al.*, 2010) observou-se a presença de um comportamento irregular da constante dielétrica da água em contato com as partículas citadas anteriormente. Já em (KAISER *et al.*, 2010) verificou-se um aumento da constante dielétrica em relação ao aumento do teor de argila e de óxido de ferro no solo.

Tabela 3. Permissividade relativa (ϵ_r) de algumas substâncias.

Permissividade (Dielétrico)	ϵ_r (Valores médios)
Ar	1.0
Mica	5.0
Vidro	7.5
Água destilada	80
Borracha	3.0
Teflon	2.0

Fonte: Adaptado de Boylestad, 2012.

O efeito do dielétrico do solo se dá através da permissividade do solo (ϵ_s), que é uma propriedade física representativa à resposta de uma corrente alternada que percorre o solo. O solo se comporta de forma complexa similar a um circuito elétrico envolvendo impedância (grandeza que mede a resistência da passagem de corrente). Assim sendo, tem-se uma parte da permissividade complexa real (ϵ_r) e outra imaginária (ϵ_i), análoga a um circuito resistor/capacitor (circuito RC), na qual, há uma parte real (resistor) invariável em relação à frequência do sinal de entrada (tensão/corrente), e a outra parte imaginária (capacitiva, mais especificamente, reatância capacitiva), em que seu comportamento permitirá a condução (ou

não) de um sinal, em função da variação de frequência do sinal aplicado. No solo, a permissividade complexa real também chamada de constante dielétrica (ϵ_r) é uma representação da quantidade de energia armazenada no solo devido a polarização das cargas elétricas.

Já a permissividade complexa imaginária é conhecida como “fator de perda” uma vez que há realmente uma perda de energia no solo, quando uma corrente se desloca pelo material (matriz do solo). Isto posto, a permissividade do solo é dada pela Equação 20.

$$\epsilon_s = \epsilon_r + j\epsilon_i \quad (20)$$

No que diz respeito ao efeito da frequência na permissividade do solo, a parte imaginária pode ser reescrita levando em consideração a condutividade elétrica (σ) e a frequência (ω) conforme a Equação 21.

$$\epsilon_i = \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (21)$$

2.9.4 Influência do solo no campo elétrico gerado pelo sensor

As propriedades do solo influenciam diretamente a estimativa da umidade do solo obtida por sensores que utilizam técnicas eletromagnéticas, seja em baixas frequências (kHz) ou em altas frequências (MHz/GHz), uma vez que essas propriedades interagem com o campo elétrico gerado pelos sensores, podendo resultar em estimativas imprecisas da umidade do solo. Dentre essas propriedades, destacam-se a textura, a salinidade, a quantidade de matéria orgânica, a temperatura e a densidade do solo (ABDULRAHEEM et al., 2024).

A temperatura influencia diretamente na solução do solo, contribuindo na dispersão dos íons dissolvidos e aumentando a condutividade elétrica da fase da solução do solo, principalmente na região próxima a superfície. Com base na Equação (20), os sensores eletromagnéticos (como o proposto nessa tese), procuram mensurar de forma mais precisa a permissividade complexa real (parte real), e minimizar os efeitos da permissividade complexa imaginária (parte imaginária) que é fortemente afetada pela temperatura e frequência (ROBINSON et al., 2008). A salinidade do solo contribui de maneira expressiva para o erro na aferição da umidade do solo, pois seus íons dissolvidos aumentam consideravelmente a condutividade elétrica. Esses íons dissolvidos nos poros dos solos interagem com o campo elétrico gerados pelos sensores, assim, um sensor que produz um campo elétrico em baixa frequência (kHz) é mais suscetível a erro, visto que, os íons conseguem se mover livremente em resposta ao campo. Contudo, quando o campo gerado é de alta frequência (MHz), uma vez que a mudança na direção do campo ocorre muito rápido e os íons não acompanham a inversão do campo, consequentemente, a condutividade elétrica diminui (ABDULRAHEEM et al., 2024).

No que se refere a textura do solo, solos com a maior presença de argila retêm mais água e possuem maior superfície para polarização. Assim, em baixas frequências o efeito da textura nos sensores eletromagnéticos é perceptível e ocasiona uma superestimação da umidade do solo, já em altas frequências esse efeito relacionado a textura é minimizado (SZYPLÓWSKA et al., 2019). Como a água possui um momento dipolar permanente, ao se aplicar um campo elétrico externo há uma tendência de alinhamento das moléculas de água em relação a esse campo, ou seja, ocorre uma reorganização espacial das cargas em um determinado intervalo de tempo. Todavia, quando a intensidade desse campo elétrico diminui até atingir uma condição de ausência, as moléculas retornam ao seu estado aleatório. Essa despolarização ocorre após

um intervalo de tempo denominado tempo de relaxamento e é diretamente influenciada pela frequência do campo aplicado. Dessa forma, o relaxamento dielétrico limita a capacidade da água de responder a campos elétricos alternados em altas frequências; assim, a água adsorvida apresenta menor capacidade de reorientação espacial (ARCONE; BOITNOTT, 2012).

2.10 Métodos de Determinação de Umidade do Solo

A umidade do solo apresenta-se em três formas: gravitacional, capilar e higroscópica. A umidade gravitacional (também denominada *água efêmera*) está presente nos macroporos, movendo-se com elevada velocidade devido à ação da força gravitacional. Já a umidade capilar encontra-se nos microporos do solo e mantém-se aderida em razão das forças de coesão e adesão. Essa forma de umidade é responsável por diversos aspectos físico-químicos, biológicos e mineralógicos da interação solo-ambiente. No que diz respeito à umidade higroscópica, ela se manifesta como uma película em torno da superfície das partículas do solo. A medição da umidade do solo na agricultura ainda está limitada a alguns tipos de sensores, cujo uso se torna restrito, principalmente em função de certos fatores, tais como: elevado custo, baixo desempenho em solos salinos e pequeno volume de amostragem (a maioria dos sensores é restrita a profundidades de até 2 metros). Nos últimos anos, os sensores baseados em princípios eletromagnéticos (ou dielétricos) vêm se destacando pelo uso frequente em diversos estudos, uma vez que apresentam boa acurácia na medição da umidade do solo (S.U. *et al.*, 2014b). Dentre os métodos dielétricos, o presente relatório abordará os tipos: Capacitivos, como: Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR, do inglês *Time Domain Reflectometry*) e Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR, do inglês *Frequency Domain Reflectometry*), além dos métodos diretos e destrutivos como Termo-gravimetria, Tensiometria, Resistivo, Sonda de Nêutrons (SN) e Radar de Penetração no Solo (GPR, do inglês *Ground Penetrating Radar*). Nas Tabelas 4 e 5 são apresentadas uma análise comparativa e as vantagens e desvantagens dos diferentes métodos de medição de umidade do solo respectivamente.

2.10.1 Método termo-gravimétrico

Essa técnica envolve uma medição direta, na qual é retirada uma amostra de solo com volume conhecido e colocada em estufa a 105 °C por 24 horas. Para o cálculo da umidade, realiza-se a pesagem da amostra antes (solo úmido) e após a secagem em estufa (solo seco); a diferença entre as massas obtidas permite determinar o teor de água em porcentagem no volume pré-determinado. Dessa forma, a umidade gravimétrica corresponde à razão entre a massa de água e a massa de solo seco, enquanto a umidade volumétrica representa a quantidade de água por unidade de volume total de solo. O método termogravimétrico é amplamente utilizado, apresentando como vantagens o baixo custo, a fácil implementação e a boa precisão. Entre as desvantagens, destacam-se a destruição da amostra, o tempo de resposta prolongado e a dificuldade de monitoramento em grandes áreas e em curtos intervalos de tempo (ZAZUETA; XIN, 1994).

2.10.3 Método baseado em tensiometria

O tensiômetro é um dispositivo utilizado para medir a tensão da água no solo com base no potencial mátrico, isto é, na força de sucção exercida pelo solo sobre a água — a tensão com que a água é retida nas partículas do solo. Esse equipamento é composto por um corpo cerâmico poroso conectado a um tubo hermeticamente fechado, preenchido com água, no qual há um medidor de vácuo acoplado à extremidade superior. A parte que contém o corpo cerâmico é enterrada no solo, e as variações na tensão capilar, acompanhadas pelo movimento da água

através dos poros do solo, fazem com que a pressão no interior do corpo cerâmico se iguale à pressão externa. Dessa forma, o fluxo de água é determinado pela leitura do vacuômetro, permitindo estabelecer indiretamente o teor de água no solo (DOBRIYAL *et al.*, 2012). Para estimar o conteúdo de umidade do solo, é necessário obter a curva característica de retenção de água (ou curva de retenção hídrica). Entre os métodos utilizados para determinar o teor de água no solo, o tensiômetro apresenta algumas vantagens, como facilidade de uso, baixo custo, boa acurácia e caráter não destrutivo. Entre as desvantagens, destacam-se o tempo de resposta prolongado, a faixa de funcionamento restrita (0 a $-0,8$ atmosferas de sucção) e a limitação espacial da análise

2.10.4 Método resistivo

Há uma relação direta da umidade do solo com a sua resistividade. Assim, conforme a umidade aumenta, a resistividade do solo diminui. Quantificar a resistividade do solo pode ser feita através de eletrodos inseridos no solo ou pela resistividade de um material que esteja em equilíbrio com o solo (ZAZUETA; XIN, 1994). A resistividade (ρ) é uma característica do material e possui uma relação com a resistência elétrica. Pode-se obter o valor da resistência elétrica à medida que a resistividade de solo vai sendo alterada. Logo, alguns sensores de umidade utilizam essas relações para inferir a umidade do solo (SALEH *et al.*, 2016). Uma desvantagem na utilização dessa técnica está no fato de que a resistividade é afetada pela concentração de íons, portanto, a calibração não é tão trivial. As vantagens estão no custo não tão elevado, não-destrutivo e tempo de resposta instantâneo.

2.10.5 Sonda de nêutrons

A Sonda de Nêutrons (SN) é um equipamento utilizado para estimar a umidade do solo, e seu princípio é baseado na perda de energia dos nêutrons rápidos (moderação de nêutrons) através dos choques com os núcleos leves do sistema água-ar-solo. A Sonda de nêutrons é constituída por uma fonte de nêutrons rápidos, ou seja, injeção de nêutrons na ordem de 10 mil elétrons-volts (keV) a 20 mega elétrons-volts (MeV), um detector de nêutrons térmicos e um sistema para realizar a amplificação e medição dos pulsos elétricos (CHANASYK; NAETH, 1996). Os nêutrons rápidos que são emitidos pela fonte, sofrem desaceleração (nêutrons lentos de 0,01 a 0,3 eV) pela interação entre os nêutrons com os núcleos dos elementos constituintes do solo. Essa interação pode ocorrer de duas formas, pela captura de nêutrons pelos núcleos, ou pelo espalhamento de nêutrons por colisões elásticas e inelásticas com os núcleos dos constituintes do solo (KODIKARA *et al.*, 2014). Há algumas vantagens de se utilizar essa técnica, como por exemplo, é um método não destrutivo e sua resposta é rápida. Dentre as desvantagens, está sua eletrônica complexa, circuito de alta tensão e uma fonte radioativa (emissor de nêutrons) e de difícil manutenção, e alto custo para aquisição.

2.10.6 Radar de penetração no solo

O GPR (do inglês *Ground Penetrating Radar*) utiliza uma antena na superfície do solo, que transmite pulsos de ondas (de modo não guiado) de rádio de alta frequência (na faixa de MHz a GHz), onde a propagação do sinal depende das propriedades eletromagnéticas dos materiais que compõem o solo. Dessa forma, mudança na propriedade do solo faz com que o sinal seja refletido. A partir dessa reflexão é possível inferir o teor de água no solo e a sua condutividade elétrica. Esse método é rápido, não invasivo sendo muito utilizado para determinar o teor de água em grandes áreas (LUNT *et al.*, 2005). Na década de 1980, a medição de umidade no solo teve um avanço na concepção de sensores que utilizam o eletromagnetismo

para inferir a umidade do solo. Nessa técnica a composição ar-água-solo funcionará como um dielétrico e quaisquer mudanças nessa composição altera o valor do dielétrico sendo possível assim, associá-lo a variação de umidade do solo. A seguir são apresentados os métodos utilizados por eletromagnetismo (dielétrico).

2.10.7 Métodos capacitivos

O princípio de funcionamento de um sensor capacitivo para medir a umidade do solo baseia-se na medição da constante dielétrica do solo. Essa medição é realizada a partir da variação da capacitância entre placas inseridas no solo, que muda conforme a quantidade de água presente. Em outras palavras, o aumento da constante dielétrica é diretamente proporcional ao aumento da umidade do solo. A matriz do solo (ar-água-solo) constitui o meio dielétrico do sensor capacitivo. A capacitância entre os elementos sensores (placas fixas) varia conforme a presença de moléculas livres de água, de acordo com o campo elétrico gerado pelo sensor no meio (ELLER; DENOTH, 1996). Dentre os sensores capacitivos tem-se o TDR e o FDR.

2.10.8 Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

Nessa técnica é determinada a velocidade de propagação (n) de um pulso eletromagnético no solo. Isto é, estabelece a permissividade dielétrica da massa do solo medindo o atraso (*delay*) no tempo entre o pulso incidente e o refletido, que se propagam através de sondas paralelas guiadas. O TDR, utiliza pulsos na frequência de microondas (100 MHz a 3 GHz) produzidas por osciladores eletrônicos. O tempo de retorno do pulso é dado na ordem de décimo de segundo e a leitura deve ser efetuada a cada milésimo de segundo (ms). Leituras nessa ordem de grandeza não podem ser realizadas manualmente, sendo, portanto necessário um circuito elétrico apropriado para mostrar ao usuário, dados devidamente convertidos em unidades de umidade através de mecanismos correlacionados (NISSEN et al., 2003). Para medir a umidade do solo, utiliza-se um testador de cabo, que mede variações no tempo de propagação de um pulso, provocadas por uma descontinuidade na linha de transmissão da sonda. A descontinuidade é causada pela mudança no valor da constante dielétrica (k) no sistema solo-água (dielétrico). Como o solo é um sistema composto (ar-água-sólidos), a constante dielétrica que representará esse sistema (matriz) é denominada como constante dielétrica aparente (k_a), onde esse valor é alterado conforme a concentração de água no sistema, à vista disso, é possível estimar a umidade volumétrica de forma indireta.

2.10.9 Reflectometria no domínio da frequência (FDR)

A medição por Reflectometria no Domínio da Frequência (FDR) é semelhante à TDR, mas estima o teor de umidade do solo com base na variação da frequência de varredura do sinal, obtida em uma ampla faixa de frequências. Essa variação ocorre devido às propriedades dielétricas do solo. Nesse tipo de medição, a sonda atua como parte de um capacitor, utilizando o solo como dielétrico, cujo valor varia conforme a umidade do solo. Quando o capacitor é acoplado a um oscilador, forma-se um circuito eletroeletrônico, no qual alterações na frequência indicam mudanças na umidade do solo. Essa técnica apresenta boa acurácia, mas requer calibração específica para cada tipo de solo. Ao ser acionado, o oscilador gera um campo elétrico entre os eletrodos, que se propaga para a matriz do solo, polarizando as moléculas de água (ROBINSON et al., 2003). Logo, a frequência do oscilador (aproximadamente 100 MHz) é constante até que haja uma troca de capacitância na matriz do solo, ou seja, quanto mais úmido o solo, mais intenso será o dielétrico aparente (k_a) e a capacitância, entretanto, menor será a frequência (f) do circuito. O princípio de funcionamento do FDR é dependente da frequência

de oscilação e se comporta semelhante ao funcionamento de um capacitor (onde a capacitância está diretamente associada ao dielétrico) e, por esse motivo, chama-se o FDR de sonda capacitiva.

Tabela 4. Comparação dos diferentes métodos de medição da umidade do solo.

Método	Princípio de medição	Profundidade (metros)	Informações específicas	Tempo de resposta	Dimensão da medição
Termo Gravimétrico	Evaporação / ação química	Qualquer profundidade	105 °C	24 h	Gravimetria
Tensiometria	Sucção / tensão negativa	0.15 a 0.6	0 - 1 atm	2 a 3 h	Sucção
Resistivo	Resistência Elétrica	0.1 a 0.3	1 - 15 atm; Frequência de operação 100 MHz;	Instantâneo	Volumétrico
Capacitivo	Constante Dielétrica	1	Frequência de operação: 10 a 150 MHz	Instantâneo	Volumétrico
FDR	Constante Dielétrica	1	Frequência de operação 10 - 150 MHz	Instantâneo	Volumétrico
TDR	Constante Dielétrica	0.3 a 0.6	Frequência de operação: 1 MHz a 1 GHz	28 s	Volumétrico
Sonda de Nêutrons	Espalhamento de Nêutrons	< 0.3	Energia Média 5 MeV	1 – 2 minutos	Volumétrico
GPR	Rádio Frequência	Sem penetração	Frequência de operação: 1 MHz a 1 GHz	Instantâneo	Volumétrico

Fonte: Adaptado de (S.U. *et al.*, 2014b).

Tabela 5. Vantagens e desvantagens dos métodos de medição.

Método	Vantagem	Desvantagem	Monitoramento remoto
Termo Gravimétrico	Boa acurácia; independente da salinidade e do tipo do solo	Destrutivo; não permite repetibilidade; tempo de resposta elevado	Não Permite
Tensiometria	Baixo custo	manutenção regular; histereses	Permite
Resistivo	Boa acurácia; baixo custo	Calibração instável; baixa precisão em solos salinos	Permite
Capacitivo	Baixo custo (em relação ao TDR)	Calibração frequente; Baixa precisão em solos salinos	Permite
FDR	Boa acurácia; baixo custo (em relação ao TDR)	Alto custo; Calibração frequente; Baixa precisão em solos salinos	Permite
TDR	Alta resolução espacial; Não depende da textura do solo; permite repetibilidade	Alto custo; perda da Reflexão em solos com grande salinidade	Permite
Sonda de Nêutrons	Boa acurácia; não destrutivo; monitoramento espacial e temporal	Alto custo; perigo de radiação; baixo grau de resolução espacial	Permite
GPR	Não invasivo; alta resolução	Alto custo; perigo de radiação; baixa precisão em solos salinos	Permite

Fonte: Adaptado de Dobriyal *et al.*, 2012.

2.11 Transmissão de Dados sem Fio

A transmissão de dados sem fio (*Wireless*) está integrada a vários sensores e atuadores de forma que a comunicação entre eles ocorra a distâncias variadas de maneira segura, e com baixo consumo de energia (AQEEL-UR-REHMAN et al., 2014). O uso de sensores e redes sem fio na agricultura está cada dia mais comum. Sendo, por exemplo, usados para: a) Coleta de informações físicas e químicas do solo; b) Controle automático para irrigação com uso de atuadores; c) Aquisição de dados em tempo real (*online*) sobre o clima; d) Solução para ações proativas ao invés de soluções corretivas, e) Monitoramento dos animais em pastagens; f) Supervisão remota de estufas, dentre outros.

Frequentemente, é necessário monitorar variáveis físicas, como a umidade do solo, em locais distantes que não dispõem de energia elétrica nem de infraestrutura local. Nesses casos, a transmissão de dados para uma estação receptora, onde serão tratados e analisados, torna-se fundamental. Essa transmissão, sem a utilização de cabos condutores, pode ocorrer de diversas maneiras, sendo a radiofrequência uma das mais utilizadas, devido ao alcance e ao baixo custo. Para realizar essa tarefa, as ondas de rádio operam em frequências específicas e utilizam diferentes metodologias e padrões de comunicação (Tabela 6). A propagação dessas ondas se dá do dispositivo transmissor até o dispositivo receptor. Contudo, existem várias limitações à propagação, como o alcance limitado, barreiras físicas naturais e obstáculos construídos pela ação humana (TSE; VISWANATH, 2005). Na Tabela 6, há uma comparação das tecnologias utilizadas para criação de redes sem fio, onde se observa a largura de frequência (Banda), distância de atuação, taxa de transmissão de dados (*bps*, bytes por segundo), custo e o protocolo de comunicação.

Tabela 6. Comparação das tecnologias de comunicação para redes sem fio.

	ZigBee	Bluetooth	Wibree	WiFi	LoRa
Banda de frequência	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	2.4 GHz	902 a 928 MHz
Distância de atuação	30 m - 1.6 km	~ 9 – 90 m	Até ~ 10 m	~ 30 a 45 m	~ 3 a 12 Km
Taxa de transmissão	250 kbps	1 Mbps	1 Mbps	11 a 54 Mbps	27 a 50 kbps
Consumo de Energia	Baixo	Médio	Baixo	Alto	Baixo
Custo	Baixo	Baixo	Baixo	Alto	Médio
Modulação/Protocolo	DSSS, CSMA	FHSS	FHSS	DSSS / CCK, OFDM	LoRaWAN

Fonte: Adaptado de Aqeel-Ur-Rehman et al., 2014. GigaHertz (GHz); MegaHertz (MHz); Megabit por segundo (Mbps); Kilobit por segundo (Kbps); Técnicas de Modulações: DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum); FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum); Protocolos: CSMS (Carrier Sense Multiple Access); CCK (Complementary Code Keying); OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing).

2.11.1 Redes de sensores sem fio (RSSF)

Basicamente, uma RSSF executa três funções básicas: (I) detecção (II) comunicação e (III) computação (AQEEL-UR-REHMAN et al., 2014). Uma vez estimada a umidade, a comunicação dos dados pode ser realizada através de tecnologias como o *Bluetooth*, *Wifi*, *ZigBee*® e *LoRa*® (do inglês *Long Range*), e por fim, os dados são processados tipicamente em um nó central, chamado de sorvedouro. A combinação de sensores, sistemas de comunicação e processamento de dados torna cada RSSF específica, o que é definido em função dos objetivos de cada trabalho, custos, logística disponível, consumo de energia, robustez e distância entre o local de monitoramento e de processamento.

Existem vários estudos que avaliam o desempenho de RSSF, por exemplo, (BOGENA et al., 2010) avaliaram o desempenho de uma rede para monitorar a umidade em bacias hidrográficas. (FERDOUSH; LI, 2014) desenvolveram uma RSSF para monitoramento ambiental usando plataforma aberta de *hardware* (microcontrolador Atmega328p e um transmissor de dados via rádio *Xbee*), o qual foi capaz de formar uma estrutura de rede de malha complexa por conta própria, sem intervenção do programa de aplicação de utilizador que funciona no microcontrolador ou na plataforma de microprocessador. Como resultado, reduziu-se a complexidade do desenvolvimento do sistema de rede de sensores sem fio.

(MORAIS et al., 2005) implementou uma rede *Wireless* para medição de umidade do solo em uma estufa, e em campo aberto a fim de promover uma irrigação mais eficiente, após a medição os dados são enviados e armazenados em um banco de dados. (SAHITYA et al., 2016) desenvolveu uma RSSF utilizando Arduino® e a tecnologia Zigbee® para maior eficácia no procedimento de colheita. Um grupo de sensores é conectado ao Arduino® e os dados são enviados via dispositivo (*Shield*) Xbee para um coordenador central que será responsável em armazenar os dados. (DOS SANTOS et al., 2019) desenvolveram um mecanismo de previsão para antecipar possíveis disfunções na colheita (umidade e temperatura do solo) notificando o agricultor para ações corretivas, o sistema foi implantado utilizando a tecnologia LoRa® juntamente com o modelo de previsão ARIMA. No trabalho de (CODELUPPI et al., 2020) foi adotado um sistema de coleta de dados remota dos processos agrícolas, objetivando uma agricultura otimizada e sustentável. Nesse trabalho, foi utilizada uma plataforma de internet das “coisas” *IoT* (do inglês, *Internet of Things*), no qual as “coisas” são equipamentos ligados a rede de internet, de baixo custo baseada em rede de longa distância (LoRaWAN®), destinada a melhorar o gerenciamento de fazendas recolhendo dados de temperatura e umidade do ar / solo). (ISLAM, 2018) implementou um sistema inteligente de monitoramento baseado em *IoT* para prática agrícola com o desenvolvimento de aplicativo *WEB/Android* para sistema de controle de irrigação com eficiência energética, utilizando a rede de transmissão LoRa®.

2.11.2 Desenvolvimento de sensores para estimar a umidade do solo

Em termos de desenvolvimento de um sistema sensor de umidade do solo, destacam-se os trabalhos de (GAO et al., 2018a), (SHI et al., 2018a), (PETRE et al., 2020), (LLORET et al., 2021) e (BASTERRECHEA et al., 2021). (GAO et al., 2018b) projetaram uma sonda utilizando capacitância de alta frequência (HFC) onde seus dados foram transmitidos via radiofrequência com alcance de 100 metros utilizando um transceptor de 2,4 GHz modelo NRF24L01. Em (SHI et al., 2018b) embora o sensor também seja baseado na estimativa da umidade do solo por capacitância, os dados de umidade e temperatura são transmitidos via sistema global para comunicações móveis (GSM, do inglês *Global System for Mobile Communications*) e *Bluetooth*. Em (PETRE et al., 2020), o sensor desenvolvido utilizou a constante de tempo de carga do capacitor para estimar a umidade do solo e transmissão de dados via radiofrequência (módulo LoRa-RFM95). (LLORET et al., 2021) construíram um sensor para estimar a umidade do solo com base na indução elétrica gerada através de duas bobinas. Neste caso, uma das bobinas gera um campo magnético que afeta a bobina acoplada, através de indução mútua (força eletromotriz). Assim, a permeabilidade magnética relativa foi utilizada para estimar a umidade do solo, uma vez que é afetada pelo tipo e umidade do solo. A transmissão de dados foi realizada via Wi-Fi usando o microcontrolador ESP32 DevKIT. Em (BASTERRECHEA et al., 2021), um sensor de umidade do solo baseado em bobinas indutivas e campos eletromagnéticos foi projetado e calibrado em laboratório, onde variações no número e distribuição das bobinas que compõem o sensor foram avaliadas para melhor desempenho. Este sensor possui características semelhantes ao utilizado por (LLORET et al., 2021), uma vez que utiliza o fenômeno da indutância mútua, mas sem transmissão de dados sem fio.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Protótipo de um Sistema de Monitoramento Sem Fio de Umidade do Solo

O sistema proposto neste trabalho tem como foco o monitoramento do solo para aplicações não apenas na agricultura, mas também na prevenção de desastres, estudos hidrológicos, obras de engenharia, mapeamento digital da variabilidade espacial e temporal da umidade do solo e em interpretações derivadas, como grau de saturação do solo, necessidade de irrigação e risco de movimentos de massa. As unidades de monitoramento de umidade propostas são compostas por módulo de sensoriamento, módulo de alimentação e módulo de transmissão de dados, todos integrados por um módulo de controle. Os dados adquiridos em cada nó da rede são transmitidos, armazenados e processados remotamente, compondo um sistema de gerenciamento de dados em tempo real.

3.1.1 Visão geral do sistema

O sistema sem fio para monitoramento da umidade do solo proposto consiste em uma sonda multissegmentada composta por: (a) módulo de sensoriamento; (b) módulo de alimentação; (c) módulo de transmissão de dados; e (d) módulo de controle. Todos esses componentes estão instalados em campo, conforme ilustrado na Figura 10. Além disso, o sistema conta com um centralizador (receptor) e um servidor, que trabalham em conjunto para permitir o monitoramento remoto dos dados de umidade. O módulo sensor proposto utiliza o dielétrico do solo como princípio de medição da umidade, associado à tecnologia HFC, e é composto por três segmentos. Cada segmento fornece uma estimativa da umidade em sua respectiva profundidade: 10, 30 e 50 cm. Em cada segmento, uma placa eletrônica converte as variações da umidade do solo — decorrentes da mudança do dielétrico causada pela presença de água — em tensão elétrica (V), permitindo posteriormente o envio dos dados ao centralizador (gateway). O módulo de alimentação é formado por um arranjo composto por placa fotovoltaica (solar), controlador de carga e bateria, garantindo a alimentação da sonda e dos demais componentes. Para a transmissão de dados sem fio, foi utilizada a tecnologia LoRa®, escolhida por seu longo alcance e baixo consumo de energia. Por último, o módulo de controle TTGO T – Beam (transmissor) é responsável por controlar o tempo de leitura, condicionamento e envio dos dados de umidade até o centralizador (Gateway).

Nas Figuras 10 e 11 é possível observar o sistema geral, onde tem-se a placa fotovoltaica, painel eletrônico (composto por controlador de carga, regulador de tensão, relé, bateria e o TTGO - transmissor), além da sonda segmentada propriamente dita. A central consiste em um TTGO – receptor, que recebe os dados enviados pelo TTGO (transmissor), através do protocolo de comunicação LoRa e encaminha esses dados para um *cluster* com hospedagem em nuvem. O sistema de supervisão gráfica que permite ao usuário observar os dados de umidade do solo em tempo real (*online*), é composto pelo TTGO - receptor, e um microcomputador Raspberry Pi 4 que funciona como servidor local. Nesse servidor foi instalada uma plataforma de automação de código aberto que apresenta e atualiza o gráfico conforme a chegada de novos valores ao *cluster*. A distância máxima alcançada entre o TTGO (transmissor) e o TTGO (receptor) foi de 642 m. Para atingir essa distância foi realizado experimento no qual foi observado a maior distância em função da potência do sinal. Isso é fundamental pois com potência baixa pode ocorrer de não haver o recebimento da mensagem correta, ou seja, perda de pacotes de dados.

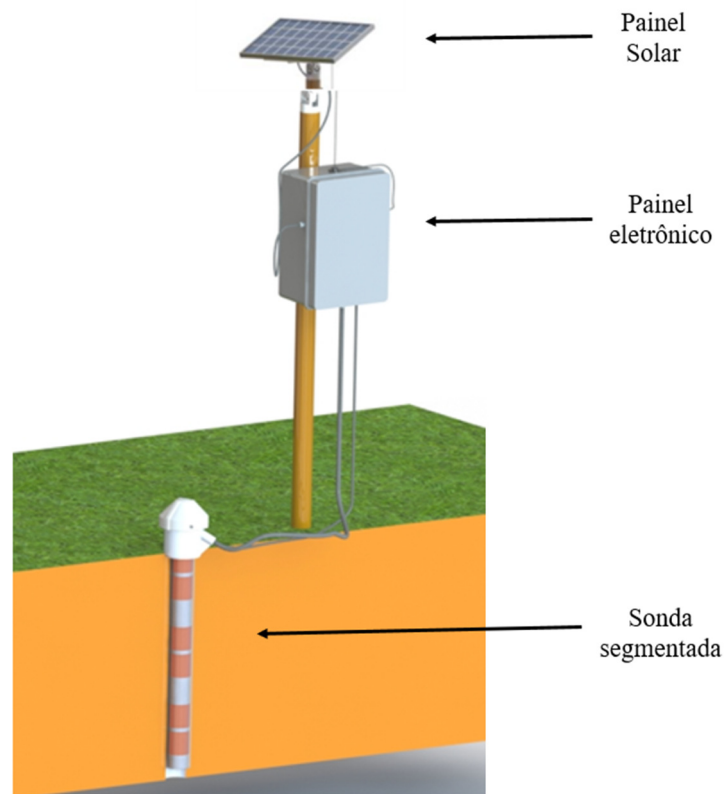


Figura 10. Visão geral do sistema instalado no campo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

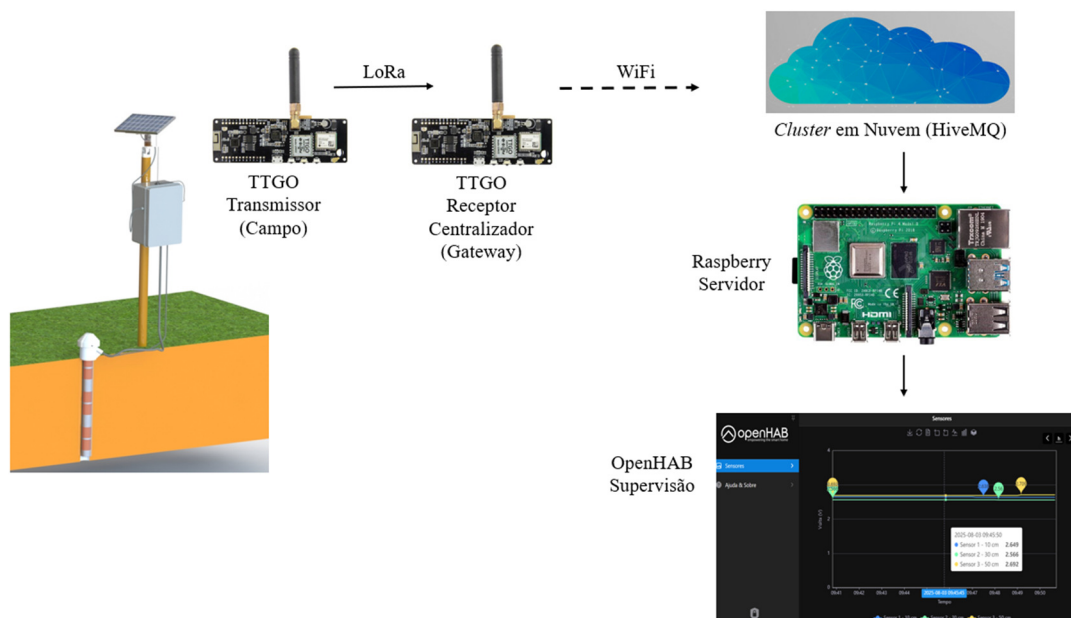


Figura 11. Visão geral do sistema de monitoramento de umidade do solo. Fonte: Elaborada pelo Autor.

3.1.2 Modelagem da sonda

Na Seção 2.9.2, foi apresentada a formulação da capacitância considerando capacitor de placas paralelas. Entretanto, a sonda proposta neste trabalho (elemento sensor) possui configuração cilíndrica, formada por anéis de cobre. Assim, a partir da Equação 17, o sistema

pode ser modelado considerando o raio (R), diâmetro, altura dos anéis (w) e a distância entre eles (D), conforme ilustrado nas Figuras 12 e 13.

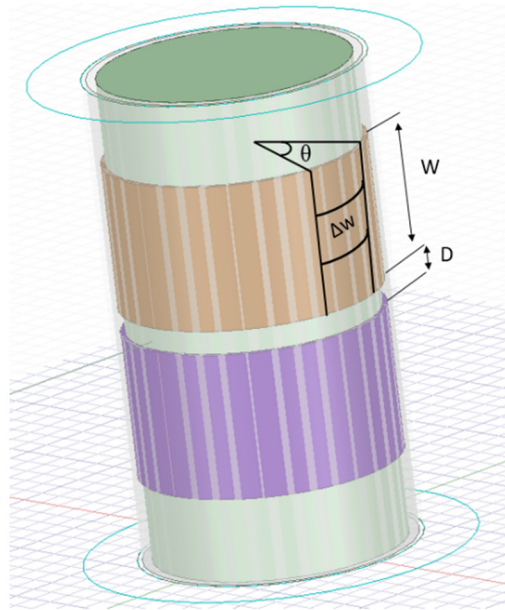


Figura 12. Configuração para modelagem do elemento sensor. Fonte: Elaborado pelo Autor.

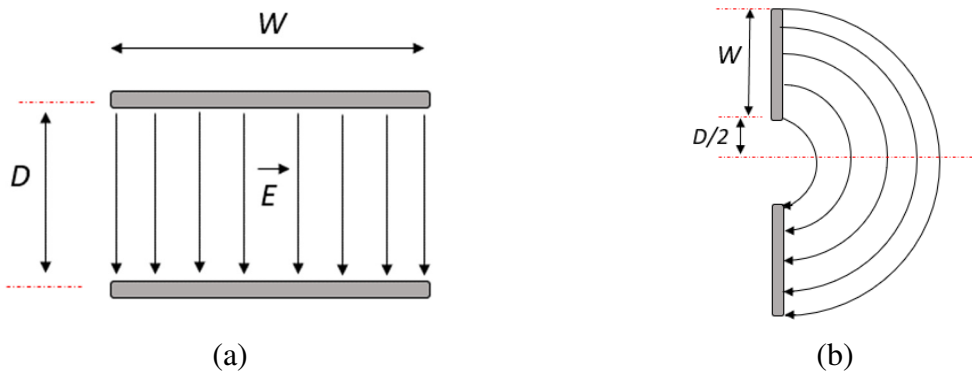


Figura 13. (a) Modelo de capacitor de placas paralelas horizontal e (b) Modelo de placas paralelas na vertical. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Haja vista os trabalhos desenvolvidos por (WANG et al., 2014) e (HU et al., 2021), pode-se realizar a modelagem analítica da sonda considerando uma parte incrementada pelo ângulo (θ_i) em razão da variação altura (Δw) conforme Figura 12, a variação da área (ΔA_v) em função do raio do anel será discriminada pela Equação 22:

$$\Delta A_v = R \theta_i \Delta w \quad (22)$$

Considerando o efeito de borda máximo no ponto onde tem-se a metade da distância entre as placas ($D/2$), e levando em consideração a distância do semicírculo da borda como ($D/2 + w$), aplicando a variação da área e a distância do semicírculo na Equação (23), observa-se:

$$\Delta C = \frac{(\in R \theta_i \Delta w)}{\pi \left(\frac{D}{2} + w \right)} \quad (23)$$

Após o desenvolvimento matemático foi possível alcançar a equação da modelagem do sistema proposto, primeiro isolando os termos passíveis de derivação, em seguida realizando a integração, com isso, a representação analítica do sistema se dá pela Equação 24.

$$\begin{aligned} \Delta C &= \frac{(2 \in R \theta_i)}{\pi} \frac{\Delta w}{(D + 2w)} \\ \int dC &= \frac{2 \in R \theta_i}{\pi} \int_0^w \frac{1}{D + 2w} dw \\ C &= \frac{(2 \in R \theta_i)}{\pi} \frac{1}{2} [\ln(D + 2w) - \ln D] \\ C &= \frac{\in R \theta_i}{\pi} \left[\ln \left(\frac{D + 2w}{D} \right) \right] \end{aligned} \quad (24)$$

3.1.3 Simulação da sonda

Foi realizada a simulação para observar o comportamento do vetor do campo elétrico em função da sua estrutura física usando como dielétrico o ar ($\epsilon_0 = 1$) e a água ($\epsilon_0 = 81$). O *Software* utilizado é o ANSYS Maxwell® 3D. Por meio dessa simulação, analisou-se a interação entre os anéis de cobre, o tubo de PVC que serve como base da sonda e o dielétrico, assim como o comportamento das linhas de força do sistema. As linhas de força do campo elétrico são fundamentais para determinar o alcance de atuação do sensor, ou seja, o raio no qual o sensor consegue detectar a umidade do solo.

Para a simulação, aplicou-se uma diferença de potencial de 5 V entre os anéis: o anel superior foi definido com 5 V e o anel inferior com 0 V. Ambos estavam inicialmente separados por uma distância de 5 mm, possuindo altura de 4 mm e raio de 5 mm. O resultado da simulação do vetor do campo elétrico, considerando os parâmetros estruturais do capacitor (área, espaçamento e dielétrico), é apresentado na Figura 14. As linhas de campo convergem do anel superior (maior potencial) em direção ao anel inferior (menor potencial). A intensidade do campo apresenta variação: é maior entre os anéis (representada pela coloração laranja) e diminui à medida que se aproxima das regiões externas delimitadas na simulação (representada pela coloração azul).

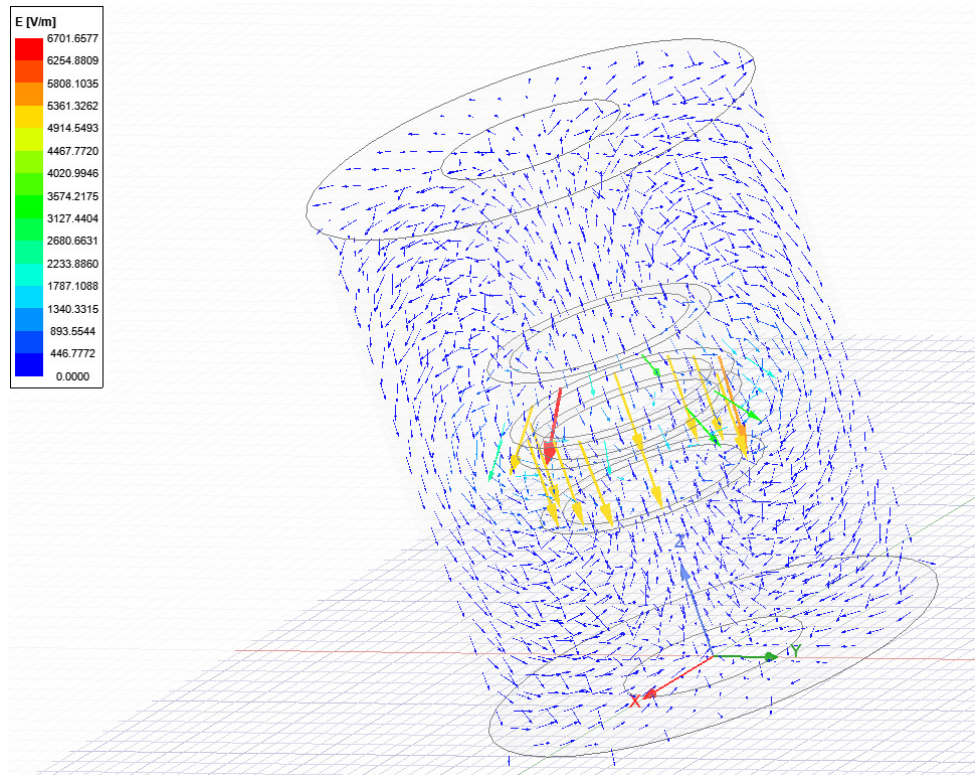


Figura 14. Simulação do vetor campo elétrico no segmento da sonda. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.4 Projeto de construção física

A construção física do segmento da sonda foi composta por dois anéis de cobre (elemento sensor), cujas dimensões e distâncias foram definidas com base em um estudo que determinou a configuração capaz de proporcionar a maior variação da capacitância em função da altura dos anéis (w) e da distância entre eles (D). Foram realizados dois cenários de simulação: um com o segmento imerso em água e outro em ar. Os resultados desse estudo podem ser observados nas Tabelas 9 e 10, apresentadas no capítulo de resultados. Uma proposta para a construção física da sonda é apresentada na Figura 15, na qual são mostrados os segmentos e a união responsável por interligar mecanicamente os segmentos.

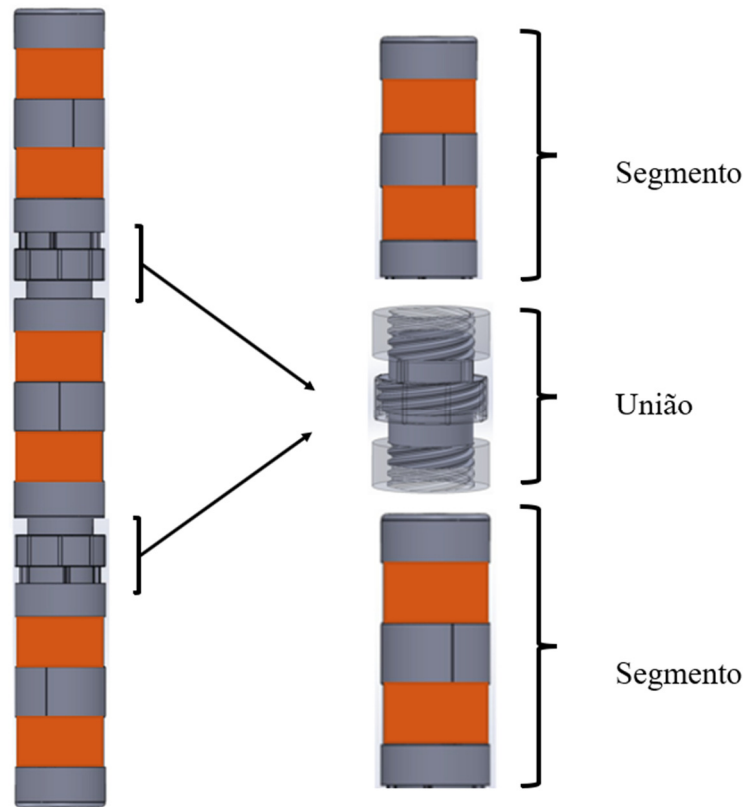


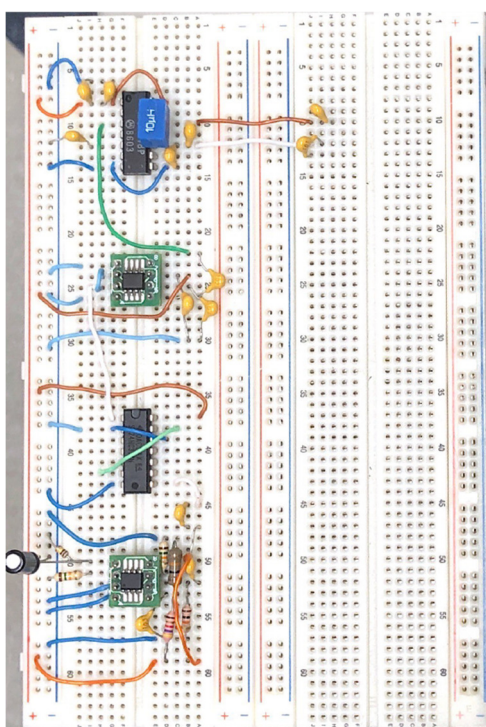
Figura 15. Apresentação da construção física da sonda. Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.1.5 Construção da placa eletrônica da sonda (Fenolite)

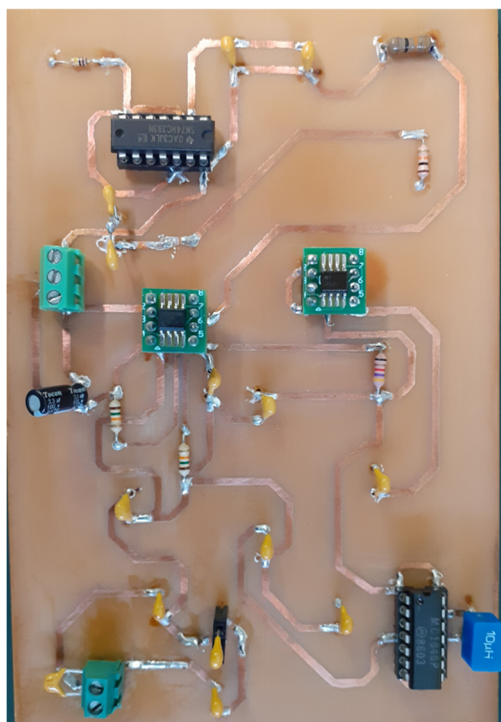
Para confecção da placa eletrônica, utilizou-se o *software* Proteus, que permite projetar e construir placas de circuitos impressos (PCB, do inglês *Printed Circuit Board*), nos quais serão inseridos os dispositivos eletrônicos, como os capacitores, indutores e resistores. A montagem dos eletrônicos na PCB é feita utilizando a tecnologia de montagem superficial (SMD, do inglês *Surface Mounted Device*), que possibilita a miniaturização e otimiza o espaço físico. Antes da confecção em SMD, o mesmo projeto foi utilizado para confecção de uma placa de forma “artesanal”. A placa foi confeccionada em fenolite (Figura 16) que é um material (resina fenólica) desenvolvido para atender a necessidade de isolante elétrico recoberto por uma camada de cobre, nela foram instalados os circuitos integrados (CI) de forma perfurada com os componentes tendo encapsulamento de furo passante (DIP, do inglês *Dual in Line Package*) como observado na Figura 17 (b). Após sua finalização, realizou-se testes para observar seu funcionamento, principalmente o comportamento eletrônico em função de dois meios: ar e água.



Figura 16. Confeção da placa de fenolite para construção do protótipo. Fonte: Elaborado pelo Autor.



(a)



(b)

Figura 17. (a) Circuito montado na Protoboard; (b) Circuito montado na placa de fenolite com componentes DIP. Fonte: Elaborado pelo Autor.

A placa eletrônica é composta por vários circuitos integrados cada um com função específica para que seja possível a conversão da estimativa da umidade volumétrica do solo em tensão elétrica, para isso, utilizou-se alguns circuitos integrados dispostos em cascata, dentre eles:

I - Oscilador controlado por tensão (VCO, do inglês *Voltage Controlled Oscillators*) modelo MC1648P da Motorola® (Figura 19) é um circuito integrado que combinado a um

circuito externo chamado de circuito ressonante (Figura 18) formado por um indutor e um capacitor dispostos em paralelo são capazes de converter os valores da multiplicação entre os valores de indutância (L) e de capacitância (C) em sinais de frequência conforme a Equação 25. A ressonância fica evidente quando a energia armazenada em um elemento reativo (componentes eletrônico capaz de armazenar energia) for igual à fornecida por outro elemento reativo do mesmo circuito, em outras palavras, a energia oscila entre os elementos (BOYLESTAD; NASHELSKY, 1984).

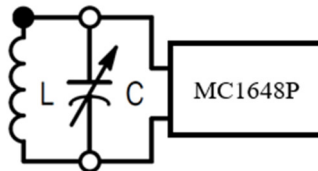


Figura 18. Circuito ressonante LC. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Conforme o valor da capacitância for variando mediante o valor de indutância fixo, o sinal de saída do VCO será diretamente proporcional a variação sofrida pelo capacitor em amplitude e frequência, demonstrado na Equação 25.

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (25)$$

Em seguida, o sinal de saída do VCO em MHz é entregue aos CIs subsequentes que compõem a parte responsável pela divisão de frequência. Essa divisão torna-se necessária, dado que o CI responsável por converter frequência em tensão elétrica trabalha com sinais na escala de kHz.

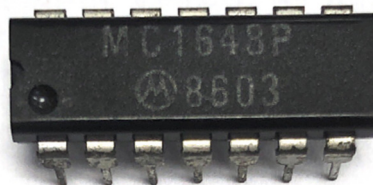


Figura 19. Circuito integrado MC1648P. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

II - O circuito divisor de frequência é composto pelo *Prescaler* MC12017 da Motorola® (Figura 20), e o contador binário SN74HC393N da *Texas Instruments* (Figura 21). Entretanto, cada um deles realiza a divisão da frequência de maneira específica.

O *Prescaler* permite a divisão da frequência de entrada por um valor pré-estabelecido. Segundo sua folha de dados (*datasheet*) esse valor consta como 65. A placa eletrônica possui uma tensão de alimentação regulada em 5 Vcc, e essa alimentação garante o funcionamento de todos os circuitos presentes, em específico o *Prescaler* opera com tensões de alimentação entre 4,5 e 9,5 Vcc, baixo consumo de corrente de aproximadamente 7,5 miliamperes (mA), e sua frequência padrão de entrada pode chegar até 225 MHz contemplando assim os sinais vindos do VCO uma vez que a frequência máxima enviado por ele é de aproximadamente 14 MHz frequência projetada com auxílio do circuito ressonante.

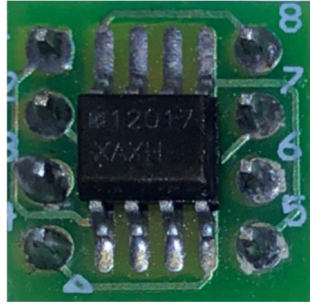


Figura 20. Circuito integrado MC12017. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

O contador binário assim como o *Prescaler*, também realiza a divisão da frequência. Entretanto, devido a sua composição interna esse circuito integrado permite a divisão do sinal de entrada por 256. Sua tensão de alimentação para operação deve estar entre 2 e 6 Vcc, a corrente necessária para funcionamento 80 microamperes (μA) e sua frequência máxima de entrada permitida é de 25 MHz.



Figura 21. Circuito integrado SN74HC393N. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

O sinal gerado pelo VCO após o circuito de divisão de frequência compreende uma escala de valores de 1 kHz a 250 Hz conforme a variação da capacitância. Essa faixa de frequência pode ser convertida em tensão elétrica utilizando o circuito integrado LM331.

III - Conversor de frequência em tensão elétrica LM331 da Texas Instruments (Figura 22) possui uma conversão linear (0,01 % de erro) operando com tensão de alimentação de 5 Vcc, faixa de frequência entre 1 Hz até 100 kHz e consumo de 5 mA. Sua conversão é dada a partir da frequência de entrada (F_{in}) associado aos resistores e capacitores ligados ao circuito integrado conforme a Equação 26.



Figura 22. Circuito integrado LM331. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

$$V_{out} = F_{in} \cdot 2,09 \cdot \frac{R_L}{R_S} \cdot (R_a \cdot C_a) \quad (26)$$

Os valores dos resistores e capacitores da Equação (26) utilizados na construção do protótipo da placa eletrônica estão dispostos na Tabela 7.

Tabela 7. Valores dos componentes eletrônicos utilizados no protótipo e na conversão de frequência em tensão elétrica.

Componentes eletrônicos		
Resistores	R_L	100 k Ω
	R_S	15 k Ω
	R_a	10 k Ω
Capacitor	C_a	10 nF

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A placa eletrônica desenvolvida faz parte do processo da implementação da sonda para estimar a umidade do solo, pois ela é a responsável em detectar a variação da umidade do solo e convertê-la em tensão elétrica. Após o processamento desses sinais serem processados, eles são encaminhados para a placa de prototipagem eletrônica TTGO T-Beam (Figura 30) que realiza a leitura de tensão elétrica (mV) por uma de suas portas programáveis de entradas analógica via rádio frequência (LoRa). A Figura 23 apresenta todas as etapas para o processamento do sinal abrangendo a estimativa da umidade do solo até a transmissão dos dados a uma estação de supervisão e monitoramento.

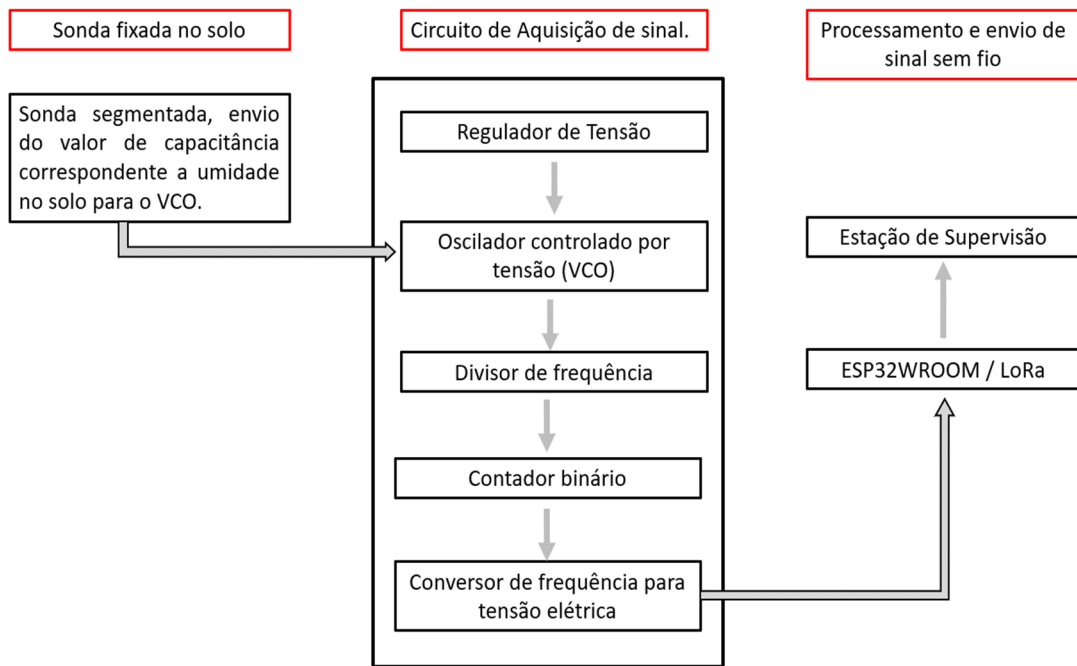


Figura 23. Componentes para o processamento de sinal. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com a confecção do protótipo eletrônico concluído (Figura 24), realizou-se testes para validar seu funcionamento. No que diz respeito aos testes, utilizou-se capacitores comerciais para simular os dados proveniente da sonda que estará em paralelo ao circuito ressonante. Esse circuito será formado por um indutor (10 μ H) e um soquete para inserção do capacitor auxiliar ($C_{auxiliar}$) com intuito de aumentar os valores de capacitância do capacitor que simulará a sonda (C_{sonda}). Outros dois capacitores de 100 pF cada foram empregados em série ao capacitor que irá simular a sonda para minimizar os efeitos da capacitância parasita (valores de capacitância indesejáveis gerados pelas impedâncias dos componentes). Portanto, a capacitância total (C_{Total}) do circuito ressonante é expressa na Equação 27.

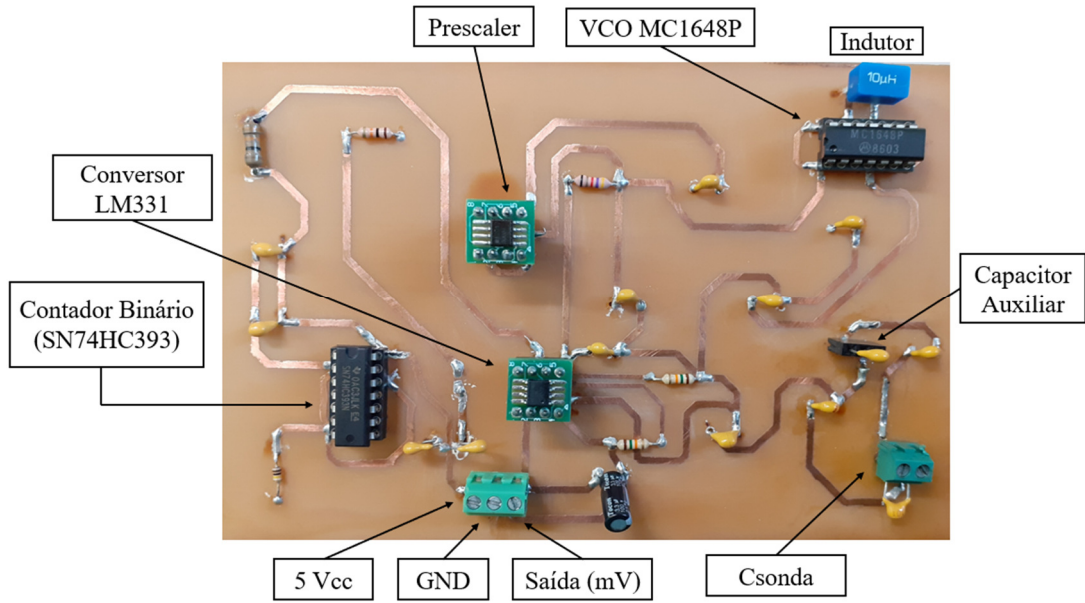


Figura 24. Protótipo da placa eletrônica. Fonte: Arcevo fotográfico do Autor.

$$C_{Total} = \left(\frac{50 \cdot 10^{-12} \cdot C_{sonda}}{50 \cdot 10^{-12} + C_{sonda}} + C_{auxiliar} \right) \quad (27)$$

Para validar a placa eletrônica, foram realizadas as medições nas saídas de cada componente presente na placa. Para a análise dos componentes VCO, *Prescaler* e o contador binário utilizou-se um osciloscópio da empresa *Agilent Technologies* modelo DSO-X 2024A para avaliar as frequências correspondentes. Já para análise do conversor, mediu-se a tensão de saída com um multímetro digital da empresa Minipa modelo ET-2402B. A energização do circuito eletrônico foi realizada com uma fonte simétrica ICEL modelo PS5000 de dois canais simétricos fornecendo assim uma alimentação constante de 5 Vcc. A montagem da simulação pode ser vista na Figura 25. A concepção da placa eletrônica feita de forma artesanal (fenolite) serve para validar não somente o funcionamento do circuito eletrônico como sua robustez.

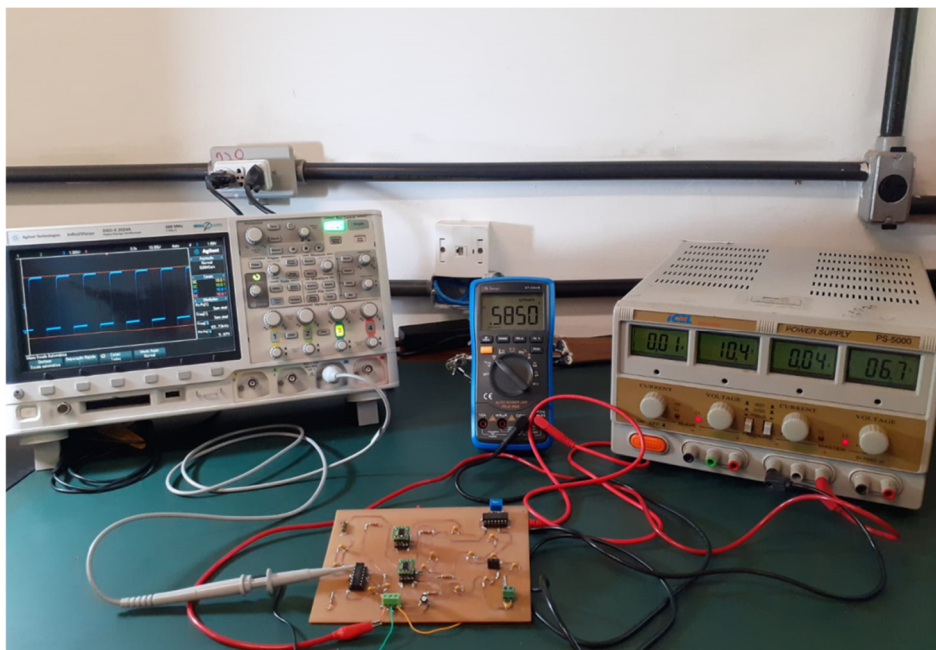


Figura 25. Medições para análise do comportamento da placa eletrônica. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

Em cada simulação os valores dos capacitores foram substituídos conforme a Tabela 8. A simulação procederá de forma a fixar um valor do $C_{auxiliar}$, e em sequência alterando os valores do C_{sonda} .

Tabela 8. Valores dos capacitores em pF utilizados na simulação para validação da placa eletrônica.

C_{sonda} :	2,5	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25
	27,5	30	32,5	35	47	56	68	78	100	
$C_{auxiliar}$:	10	20	30	47	56	68	78	100		

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Após a validação da placa em fenolite, foi construída uma placa em SMD com os mesmos componentes com intuito de miniaturização para que seja possível acoplá-la internamente em cada segmento da sonda.

3.1.6 Painel solar de alimentação do sistema

O módulo de alimentação é composto por um conjunto formado por uma placa fotovoltaica para captação de energia solar e uma bateria, responsáveis pela conversão da energia solar em energia elétrica, garantindo o funcionamento da sonda e o envio dos dados pelo sistema do sensor sem a necessidade de condutores elétricos. A placa solar (fotovoltaica de silício policristalino) possui potência de 10 watts e está combinada a uma bateria de 12 V e 7 Ah, por meio da qual o sensor pode emitir os sinais de umidade em intervalos programáveis, conforme a necessidade.



Figura 26. Paine Solar para alimentação energética da sonda. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.



Figura 27. Bateria para alimentação do sistema. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

Em um dia ensolarado, sem a presença de nuvens, a energia direta proveniente da incidência solar corresponde a aproximadamente 80% da radiação solar que atinge a superfície terrestre. Já em um dia nublado, toda a radiação que chega ao solo é difusa, ou seja, encontra-se espalhada em todas as direções após interagir com a atmosfera terrestre (PEREIRA et al., 2012). Como o sistema proposto é do tipo *off-grid*, a corrente fornecida (I_F) pela placa fotovoltaica pode ser calculada por:

$$I_F = \frac{\text{Potência do Paine Solar}}{\text{Tensão do sistema}} = \frac{10 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 0,833 \text{ A} = 833 \text{ mA}$$

A energia fornecida diariamente pela placa fotovoltaica, assumindo um intervalo de intensidade de início e fim da carga útil, respectivamente das 8h às 16h, ou seja, 8 horas diárias:

$$\text{Energia fornecida} = 833 \text{ mA} \times 8\text{h} = 6664 \text{ mAh/dia.}$$

3.1.7 Cálculo energético do sistema

O cálculo do consumo energético foi realizado de forma empírica, com o auxílio de um multímetro digital modelo ET-2402B (Minipa). Foram mensuradas as correntes elétricas de todo o circuito eletrônico do sensor em dois modos de operação: a) *primeiro modo de operação*: quando o sensor está ativo, ou seja, realizando a leitura da estimativa da umidade nos três segmentos. Nesse momento ocorre o maior consumo de energia (220 mA); b) *segundo modo de operação*: quando o sensor está com o sistema básico em funcionamento, isto é, com o controlador de carga, TTGO, e o regulador de tensão ativos. Nesse modo de operação, ocorre o intervalo de tempo de espera para envio dos dados, conseqüentemente menor consumo energético (120 mA).

Tabela 9. Consumo de corrente elétrica do sistema.

Modo de operação	Tempo em funcionamento (minutos)	Consumo de corrente (mA)	Consumo total (mA.min)
Primeiro	3	220	660
Segundo	30	120	3600
			Total: 4260

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nos dados da Tabela 9, o consumo total é de 4260 mA.min, enquanto o tempo de um ciclo completo será de 33 minutos, assim, em uma hora (60 minutos) tem-se:

$$\frac{60}{33} = 1,82 \text{ ciclos}$$

Desta forma, em uma hora (60 minutos) haverá um consumo de:

$$4260 \times 1,82 = 7753,2 \text{ mA.min}$$

Convertendo em miliampere-hora (mAh):

$$\frac{7753,2}{60} = 129,22 \text{ mAh}$$

A partir do consumo médio do sistema levando em consideração a especificação da bateria de 7 Ah (equivalente a 7000 mAh), o tempo de duração será de:

$$\text{Tempo de duração (horas)} = \frac{\text{capacidade da bateria}}{\text{consumo por hora}} = \frac{7000 \text{ mAh}}{129,22 \text{ mAh/h}} = 54,17 \text{ horas}$$

Levando em consideração a perda da eficiência da bateria em 20% devido a temperatura ambiente e autodescarga, recomenda-se utilizar 80% da capacidade nominal da bateria (ALEXANDER; SADIKU, 2017).

Assim, para o cálculo da capacidade útil da bateria:

$$7000 \text{ mAh} \times 0,80 = 5600 \text{ mAh}$$

Assumindo a perda envolvendo a eficiência, o tempo de duração é de:

$$\text{Tempo de duração (20\% de perda)} = \frac{5600 \text{ mAh}}{129,22 \text{ mAh/h}} = 43,33 \text{ horas}$$

A duração da bateria assumindo perda de 20% será de aproximadamente 43 horas e 20 minutos. Já o consumo do sistema por dia:

$$129,22 \text{ mAh} \times 24 \text{ h} = 3102,28 \text{ mAh/dia}$$

O balanço diário pode ser calculado por:

$$\begin{aligned} \text{Balanço diário} &= \text{energia fornecida} - \text{consumo do sistema} \\ &= 6664 - 3102,28 = 3561,72 \text{ mAh/dia} \end{aligned}$$

Pode-se verificar que o sistema apresenta um balanço diário positivo. Sendo assim, em dias ensolarados, com alto índice de radiação, o sistema é capaz de armazenar energia na bateria, permitindo seu funcionamento durante os períodos sem incidência solar, como à noite. Para validar o sistema como um todo, foi realizado um estudo que considerou o tempo de espera para o envio dos dados de umidade, bem como as condições meteorológicas observadas durante o período de análise. Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que possui mais de 700 estações meteorológicas distribuídas em todo o território nacional, entre elas as estações automáticas — que registram dados a cada hora — e as convencionais, nas quais as coletas ocorrem três vezes ao dia.

A estação selecionada para a obtenção dos dados foi a Estação Automática Ecologia Agrícola (A601), localizada na cidade de Seropédica (Latitude: -22,75°, Longitude: -43,68°, Altitude: 35 m), no estado do Rio de Janeiro (RJ), situada a aproximadamente 1.420 m do sistema de monitoramento de umidade.

As informações disponibilizadas por essa estação incluem medições de umidade, temperatura, pressão atmosférica, velocidade e direção dos ventos, radiação solar e precipitação. Todos esses dados são integrados a cada hora e enviados à sede do INMET, em Brasília, sendo disponibilizados gratuitamente em seu site oficial.

3.1.8 Painel eletrônico

O painel eletrônico consiste em uma caixa plástica confeccionada em Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS). Sua escolha deve-se à elevada resistência mecânica, à facilidade de acesso ao interior e às juntas de abertura reforçadas. A principal função do painel é acomodar os componentes eletrônicos responsáveis pelo controle, acionamento e transmissão de dados do sistema, além de protegê-los das condições ambientais externas, especialmente da chuva.

Em seu interior estão instalados o controlador de carga, o módulo relé, o regulador de tensão, o microcontrolador TTGO-T Beam e a bateria (Figura 28).

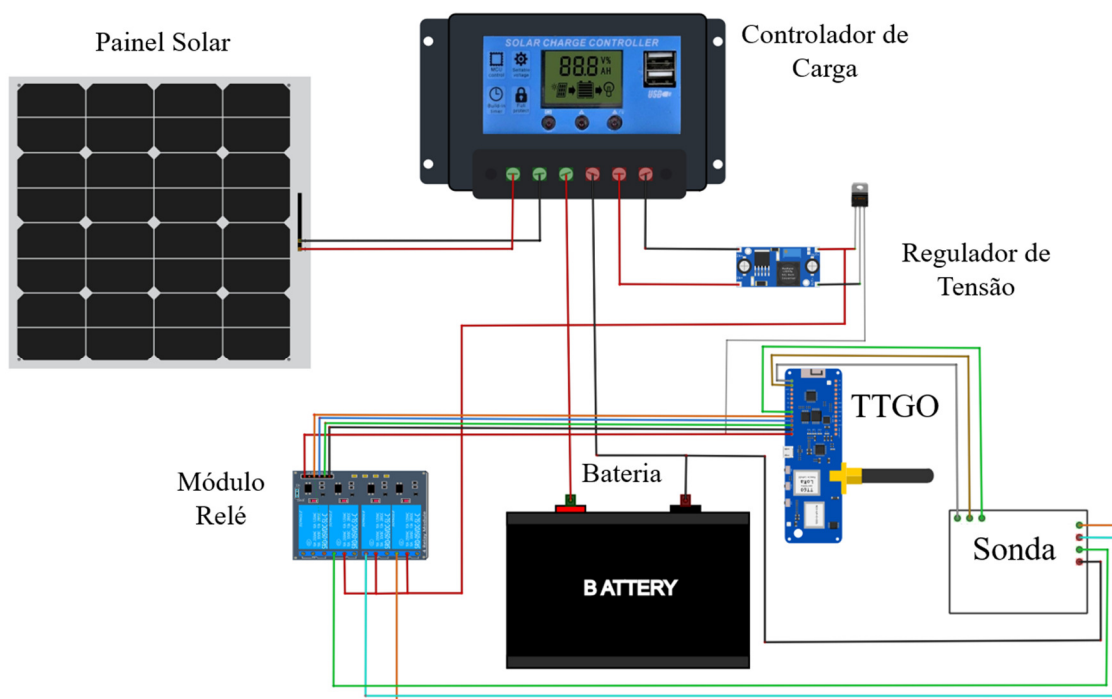


Figura 28. Componentes internos do painel eletrônico. Fonte: Elaborado pelo Autor.

a) Controlador de Carga Knup AD60A

O controlador de carga é um dispositivo eletrônico responsável por interligar o painel fotovoltaico à bateria, gerenciando seu funcionamento e otimizando o armazenamento da energia gerada. Além disso, o equipamento apresenta tensão nominal de 12/24 Vcc, corrente nominal de 10 A e faixa de temperatura de operação entre -35°C e $+60^{\circ}\text{C}$.



Figura 29. Controlador de carga para painel solar Knup AD60A. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

O controlador de carga pode ser configurado conforme: a) o tipo de bateria que será usado no sistema. Dentre as baterias tem-se a de chumbo, lítio e estacionária; b) tensão do sistema, cuja a escolha se dá de forma automática entre dois níveis de tensão (12 ou 24 Vcc); c) ajuste da tensão de flutuação, no qual o objetivo é manter a bateria carregada sem sobrecarregá-la, e com isso aumentando-se a vida útil da bateria; d) interrupção de descarga, com o valor de tensão onde o controlador de carga encerra o envio de energia da bateria para a carga, evitando assim que a danifique; e) reconexão descarga, com valor de tensão em que o

controlador de carga passa a permitir o envio de energia da bateria a carga. f) modos de funcionamento, que permitem que o usuário escolha quando o controlador deverá começar a carregar a bateria. A função modo de funcionamento, possui três configurações possíveis: I - saída da carga 24h; II - carrega após o pôr do sol e encerra depois de um horário programado (1 – 23h), e por último, III - crepúsculo até o amanhecer (0h). Os dados relacionados a escolha da configuração do controlador de carga para o presente projeto, podem ser observados na Tabela (10).

Tabela 10. Configuração feita no controlador de carga.

Tensão de flutuação (V)	Reconexão de descarga (V)	Interrupção de descarga (V)	Modo de funcionamento	Tipo de bateria
13,7	12,6	10,7	24h	Estacionária

Fonte: Elaborada pelo Autor.

b) TTGO T - Beam

O TTGO T-Beam é uma placa de prototipagem eletrônica desenvolvida pela empresa LilyGO®, que integra diversos chips embarcados, possibilitando sua aplicação em inúmeros projetos de Internet das Coisas (IoT). Entre os componentes, destaca-se o microcontrolador ESP32-WROOM, da empresa Espressif, reconhecido pelo baixo consumo de energia e por incorporar uma unidade central de processamento (CPU – *Central Processing Unit*) Dual-Core Tensilica Xtensa® LX 32 bits, capaz de operar simultaneamente com seus dois núcleos de processamento. Outros diferenciais do dispositivo incluem os recursos de comunicação sem fio, que podem ocorrer via Wi-Fi (802.11), Bluetooth 4.2 BLE (*Bluetooth Low Energy*) e LoRa®, tecnologia desenvolvida pela empresa Semtech. A tecnologia LoRa permite comunicação a longas distâncias com consumo mínimo de energia. Seu alcance típico é de 3 a 4 km em áreas urbanas, podendo variar conforme a arquitetura local e o modelo de antena utilizado (VILES *et al.*, 2024). Em áreas rurais, o alcance pode chegar a 12 km ou mais, seguindo os mesmos critérios de infraestrutura e antena acoplada ao TTGO.

No Brasil, a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) regulamenta a potência e a frequência de operação dessa tecnologia, limitando o alcance prático a aproximadamente 1 a 2 km, com frequência de 915 MHz. Associado à tecnologia LoRa, está o protocolo LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), que possibilita a comunicação entre os dispositivos, permitindo a transmissão e o recebimento de dados por meio de um centralizador (Gateway) — dispositivo responsável por estabelecer o elo entre os nós da rede e a Internet (RAPPAPORT, 2010).

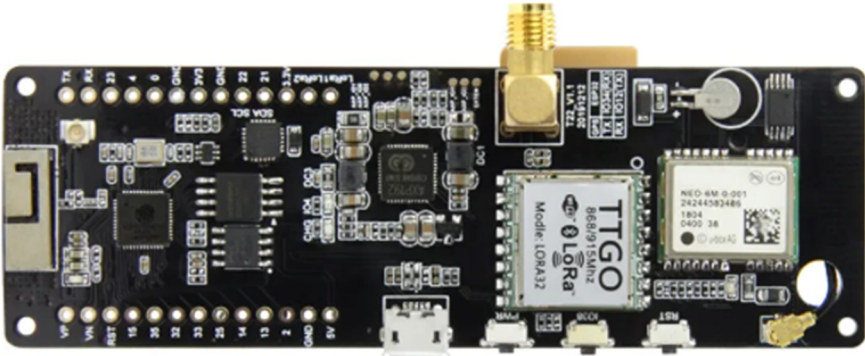


Figura 30. Microcontrolador TTGO T-Beam. Fonte: Arcevo fotográfico do Autor.

O uso do TTGO T-Beam no presente projeto é pertinente, uma vez que ele dispõe de um grande número de portas programáveis analógicas e digitais (GPIO – *General Purpose Input/Output*). Isso possibilita a utilização de conversores analógico-digital (A/D), que transformam a tensão elétrica proveniente da placa eletrônica de cada segmento da sonda (responsável pela medição da umidade do solo) em um número binário, permitindo seu processamento interno e posterior envio ao centralizador. A arquitetura geral do projeto contempla dois dispositivos TTGO: um atuando como transmissor, acoplado ao painel eletrônico, e outro como receptor, responsável por receber os dados enviados pelo transmissor e inseri-los em um cluster em nuvem, de modo que possam ser posteriormente apresentados na forma gráfica em um sistema supervisor.

c) Módulo relé optoacoplador

O módulo relé optoacoplador isolado de 4 canais (vias) modelo SRD-05VDC-SL-C, funciona como um interruptor eletrônico, e necessita ser energizado com uma tensão de alimentação de 5 V e corrente de 15 – 20 mA, e pode acionar cargas de 30 V / 10 A (corrente contínua) e 250 V / 10 A (corrente alternada). Os canais são ativados através de níveis lógicos, isto é, o microcontrolador TTGO por meio da sua programação envia os níveis lógicos para o módulo relé para o acionamento ou desligamento de uma carga. Esse módulo em específico, possui um optoacoplador, que é um componente eletrônico capaz de transferir sinais elétricos entre dois circuitos isolados usando luz, ele isola eletricamente o circuito do módulo relé do microcontrolador (TTGO).

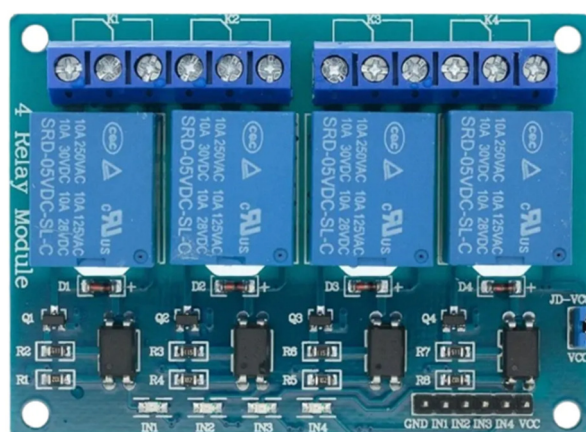


Figura 31. Módulo Relé optoacoplador 4 canais modelo SRD-05VDC-SL-C. Fonte Acervo fotográfico do Autor.

O diodo emissor de luz (LED – *Light Emitting Diode*) do optoacoplador acende quando uma corrente elétrica flui por ele, acionando o transistor interno, que, consequentemente, ativa o canal do módulo relé. O LED do optoacoplador permanece ativo quando a tensão no pino de controle está baixa; por esse motivo, para acionar um determinado segmento da sonda, o microcontrolador envia um sinal lógico baixo ao módulo relé. Para o desligamento, o microcontrolador envia um sinal lógico alto.

A programação desenvolvida permite o acionamento de cada segmento da sonda de forma individual, mantendo cada segmento energizado por 1 minuto antes de ser desativado. Esse procedimento se repete para os dois segmentos seguintes. Após o acionamento dos três segmentos da sonda, o ciclo é encerrado e reiniciado após um intervalo de 30 minutos.

d) Regulador de tensão LM2596

O regulador de tensão é um componente eletrônico capaz de reduzir a tensão de entrada, e entregar uma tensão de saída menor e ajustável, esse tipo de regulador é conhecido como *Step-Down*. Esse modelo permite trabalhar com uma tensão de entrada entre 3,2 e 40 V, permitindo uma saída ajustável entre 1,5 e 35 V. Sua função é realizar uma queda de tensão, visto que a tensão de saída do controlador de carga (12 V) é inadequada para alimentar a sonda e o microcontrolador. Sendo assim, foi necessário reduzir a tensão de 12 V para 9 V e alimentar a sonda. Já para o microcontrolador, que necessita de 5 V para seu funcionamento, foi inserido na saída do regulador de tensão um transistor modelo L7805 que produz uma tensão de saída 5 V, podendo ser alimentado por uma tensão de entrada entre 7,5 e 20 V (Figura 32).



Figura 32. Regulador de tensão modelo LM2596 Step-Down. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

3.1.9 Raspberry Pi 4 model B e OpenHAB

Raspberry Pi é um computador de placa única de alto desempenho com processador Quad-core ARM Cortex-A71 (64-Bit), memória RAM 8 GB, conectividade através de portas USB, Wi-Fi, *Ethernet*, *Bluetooth*, e ainda dispõem de 40 pinos GPIO's possibilitando assim uma versatilidade em desenvolvimentos de projetos de automação. O Raspberry possui um sistema operacional Raspberry Pi OS pré-instalado. Entretanto, ele pode suportar outros sistemas como Ubuntu e Windows 10 IoT Core que devem ser instalado em um cartão microSD, e em seguida inserido no Slot embarcado no Raspberry para seu funcionamento. Já sua alimentação se dá por meio de uma fonte de tensão de 5 V e 3 A com conector USB tipo C.

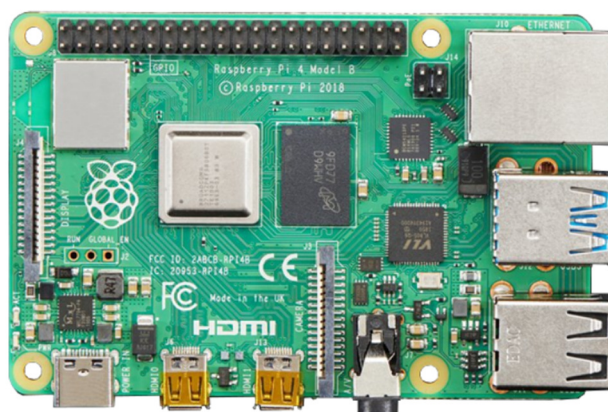


Figura 33. Raspberry Pi 4. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

No presente trabalho, o Raspberry Pi atua como servidor, ou seja, um *hardware* dedicado para executar uma função específica. Neste caso, foi instalado o OpenHAB um *software* (plataforma) de automação residencial de código aberto. Isso significa que, é possível

modificar e disponibilizar o código publicamente. Ademais, o OpenHAB conta com uma imagem pré-configurada (OpenHABian) que pode ser executado no Raspberry Pi possibilitando integrar e gerenciar dispositivos de *IoT*. Sua instalação no Raspberry é similar à do sistema operacional conforme citado anteriormente. A integração entre o OpenHAB e o TTGO (centralizador) foi possível com a utilização do protocolo de comunicação MQTT (do inglês, *Message Queuing Telemetry Transport*), pois o TTGO (centralizador) envia os dados recebidos ao *cluster* criado na plataforma HiveMQ, ou seja, um *broker* que implementa o protocolo MQTT de forma robusta e confiável. Uma vez em que os dados de umidade são enviados ao *cluster*, o OpenHAB através da sua programação (configuração) faz a leitura desses dados e os apresenta graficamente.

3.1.10 Calibração dos segmentos sensores em laboratório

O modelo de calibração empírico em desenvolvimento no departamento de Agrotecnologias e Sustentabilidade (DATS) da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, foi necessário para estabelecer uma curva de calibração que relaciona a variação da umidade volumétrica do solo (em virtude da mudança do dielétrico do solo na presença da água) em uma variação de tensão elétrica. Essa calibração é imprescindível uma vez que cada tipo de solo, devido suas propriedades, terá uma relação específica entre umidade volumétrica e tensão elétrica. Assim, para cada tipo de solo haverá uma curva de calibração associada. O trabalho de (ZAWILSKI et al., 2023) apresentou a necessidade de calibração para cada textura de solo, enfatizando assim, a ineficiência de uma única curva de calibração para os sensores que estimam a umidade do solo baseados na constante dielétrica. Outros trabalhos, dentre eles (ROWLANDSON et al., 2013) reforçam que a calibração específica para cada solo aumenta a precisão e a confiabilidade dos dados enviados pelos sensores. Os modelos de calibração foram ajustados de modo a obter menores valores de erros e maiores valores do coeficiente de determinação, para isso, foram testados polinômios de diversas ordens (primeira, segunda e terceira). Para o ajuste das equações, foram realizados os métodos dos mínimos quadrados ordinários para os polinômios de primeira ordem (equação da reta), e para os polinômios de ordem superior, foi utilizado a regressão polinomial por mínimos quadrados. O mesmo procedimento foi realizado para a calibração em campo.

As primeiras curvas de calibrações em laboratório foram realizadas para os solos com classe textural Argila, Areia franca, Argiloarenosa e de constituição orgânica. Para realizar a calibração em dois segmentos individuais (sonda 1 e sonda 2). Foram utilizados dois recipientes plástico com volume de 4,2 litros onde foram adicionados os solos e instaladas ambas as sondas, duas balanças digitais modelo US POP-S (Urano Brasil) com objetivo de monitorar o peso do solo, pois com a diminuição da umidade haverá uma redução do peso. Também foram utilizados dois multímetros digitais modelo ET-2402B (Minipa Brasil) para monitorar os valores de tensão correspondente a umidade do solo. Os segmentos designados “sonda 1” e “sonda 2” possuem configurações eletrônicas distintas para que seja possível observar o comportamento de ambas na sensibilidade do sensor. Ou seja, detecção por parte do sensor em função de uma pequena variação na umidade do solo. Assim, a que tiver um desempenho mais adequado (maior valor de R^2) serviu de referência para a montagem da sonda multissegmentada. Com o objetivo de analisar a sensibilidade e repetibilidade das duas sondas, cada recipiente foi inserido com o mesmo tipo de solo, a montagem do processo de calibração pode ser observada na Figura 34.

As amostras de solos minerais foram coletadas no Instituto de Floresta da UFRRJ e apresentam classes texturais Argila, Areia Franca e Argiloarenosa. Já o solo de constituição orgânica (96,55% de Carbono) foi coletado no município de Itaguaí – RJ, em área que vem sendo cultivado com aipim e coco.

As amostras de solo foram peneiras de malha 2 mm e secas a temperatura ambiente, obtendo assim terra fina seca ao ar (TFSA), e em seguida inseridos nos baldes. Para obter apenas o peso do solo, foram descontados os pesos das sondas, pratos, baldes, bem como o conjunto acrílico onde a sonda é inserida (Figura 34). Após os solos adicionados nos baldes, anotou-se os valores respectivos do peso e da tensão correspondente. Em seguida, iniciou-se o processo de umedecimento do solo através da adição sistemática de 100 ml de água em cada recipiente a cada 5 minutos. Assim, o solo ficava mais úmido e obtinha-se um valor de tensão elétrica para cada variação de umidade. Esse procedimento foi repetido até a saturação do solo.



Figura 34. Montagem do sistema para calibração da sonda. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

Ao atingir a saturação, iniciou-se o processo de secagem com temperatura controlada na faixa de 20 a 25 °C. O monitoramento de secagem durou até o solo retornar a uma umidade próxima daquele referente ao início do experimento (TFSA). Dessa forma, obteve-se os dados do processo completo, do umedecimento e secagem. Esse procedimento de dupla variação de umidade permite também observar o efeito da histerese e respectivo comportamento das leituras da sonda, procedimento esse é similar ao realizado por (YOUNG et al., 1997).

3.1.11 Calibração em situação de campo

Para a calibração em campo, foi escolhida uma parcela de terra localizada no setor de fruticultura do Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) (Latitude: 22°45'50''; Longitude: 43°41'45''; Altitude: 25 m). Em seguida, realizou-se a limpeza do local onde a sonda foi instalada removendo toda vegetação superficial e delimitando uma área de 2 m x 2 m. Para instalação, foi utilizado um perfurador de solo com uma broca de 60 mm, permitindo a abertura de um furo no solo com diâmetro próximo ao diâmetro do tubo de acrílico que envolve a sonda. Com o acrílico posicionado, foi inserida a sonda segmentada e ligada ao painel eletrônico. O contato direto entre o solo e o acrílico da sonda é fundamental para minimizar os erros de instalação e assim ter uma estimativa da umidade do solo mais precisa. Além da sonda, um tubo de policloreto de vinila (PVC) com 0,0508 m de diâmetro e 2,5 m de comprimento foi inserido no solo com a função e acoplar o painel eletrônico e a placa fotovoltaica no topo do tubo (Figura 38).



Figura 35. Retirada da vegetação do local para instalação da sonda multissegmentada. Fonte: Acervo Fotográfico do Autor.



(a)



(b)

Figura 36. Processo de instalação da sonda: (a) Perfuração do solo para instalação da sonda multissegmentada; (b) Ajuste das paredes do solo com o tubo de acesso. Fonte: Acervo Fotográfico do Autor.



Figura 37. Inserção da sonda multissegmentada. Fonte: Acervo Fotográfico do Autor.

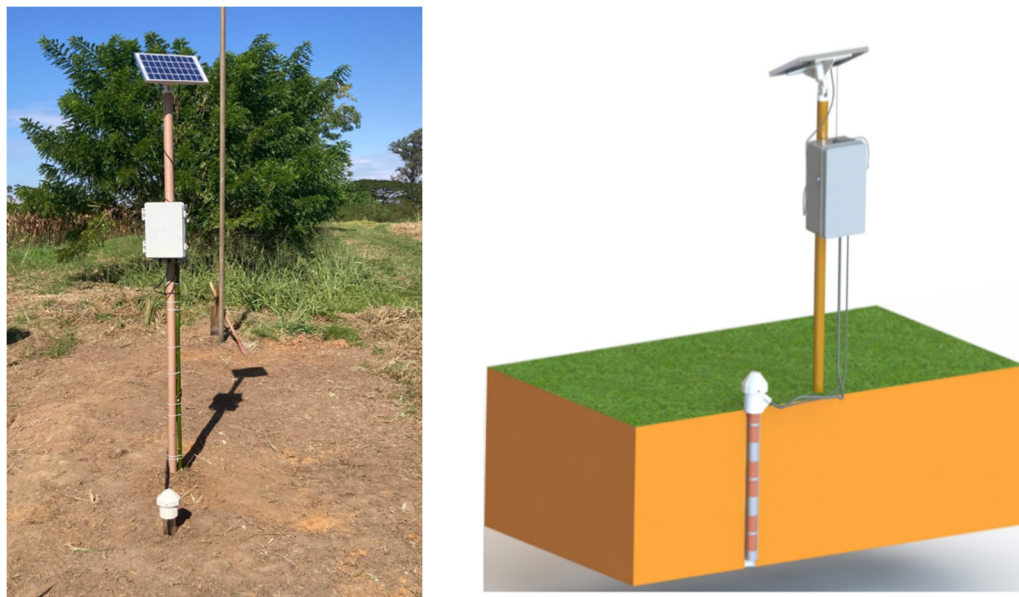


Figura 38. Conclusão da instalação do protótipo em campo. Arcevo fotográfico do Autor.

Com a área demarcada e a instalação da sonda finalizada, os dados de umidade do solo começaram a ser enviados ao centralizador (Gateway) que está localizado no Laboratório de Água e Solos em Agrossistemas (LASA) a uma distância de 642 metros. Para realizar a calibração, foi feita a variação da umidade, desde a saturação em seguida o processo de secagem natural do solo. Em cada profundidade foram feitas leituras de 3 repetições da tensão elétrica em seguida calculada a média. Em cada profundidade foram coletadas amostras para estimar a umidade do solo pelo método termogravimétrico (método padrão).

A remoção das amostras de terra para o cálculo da umidade gravimétrica foi realizada utilizando um trado holandês com 60 mm de diâmetro. Além disso, foi determinada a densidade do solo (D_s), necessária para conversão em umidade volumétrica (θ). Por isso, abriu-se uma trincheira nas proximidades da sonda (1,5 metros de distância), coletando-se três amostras em cada profundidades (10, 30 e 50 cm) (Figura 39). A partir dessas amostras, calculou-se a média da densidade do solo para cada profundidade. Ao final do experimento, foi obtido um conjunto de dados pareados de tensão elétrica média, sob diferentes umidades, e profundidades do solo.

Em cada profundidade foi ajustado um modelo, ou seja, uma equação da conversão da umidade volumétrica (θ) em tensão elétrica.



Figura 39. Trincheira aberta para coleta do solo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

3.1.12. Análises químicas e físicas do solo

Para realizar as análises químicas e físicas do solo, foram utilizados os métodos apresentados no manual de métodos de análise de solo da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (TEIXEIRA et al., 2017). Essas análises foram realizadas tanto para os solos utilizados nas calibrações em laboratório, quanto nas condições de campo.

As análises químicas de cada um dos solos caracterizados, foi analisado potencial de hidrogênio (pH), quantidade de carbono, Cálcio (Ca^{+2}), sódio (Na^{+}), Magnésio (Mg^{+2}), Alumínio (Al^{+3}), Fósforo (P), Potássio (K^{+}), soma de cátions trocáveis (Valor S), capacidade de troca de cátions (Valor T), percentagem de saturação de bases (Valor V) e a condutividade elétrica. As análises físicas, foram caracterizadas as classes texturais de acordo com a porcentagem de Areia, Silte e Argila. Bem como as densidades das partículas e dos solos.

Os resultados das análises encontram-se no Capítulo 4, Seções 4.7 e 4.8. Os testes da composição física e química de cada solo foram realizados nos laboratórios de matéria orgânica do solo (LMOS) e o de Água e Solo em Agroecossistemas (LASA) do instituto de agronomia da UFRRJ.

3.1.13. Análises estatísticas

Para avaliar a acurácia do sistema, os dados da umidade do solo fornecidos pela sonda em condições de laboratório (segmentada) e de campo (multissegmentada), foram analisados utilizando métricas que permitem verificar a dispersão dos dados em torno de uma tendência central. As métricas utilizadas foram: I) Desvio padrão (SD, do inglês *Standard Deviation*) univariada, para verificar a dispersão dos dados em relação à média (Equação 28); II) Coeficiente de determinação (R^2) bivariado, que indica quanto que o modelo preditivo é

representativo em relação aos dados observados (O_i) (Equação 29). O valor de R^2 pode variar entre 0 e 1 (ou 0% a 100%), onde quanto mais próximo de 1, mais adequado está o modelo em função dos dados observados; III) Erro médio absoluto (MAE, do inglês *Mean Absolute Error*) bivariado, que calcula a média das subtrações absolutas entre os valores preditos (P_i) e observados (O_i) (Equação 30), ou seja, quanto menor o resultado dessa média mais preciso é o modelo; IV) Erro quadrático médio (MSE, do inglês *Mean Squared Error*) bivariado, similar ao MAE, contudo, quando há uma discrepância entre o valor observado e o predito, o MSE penaliza esses erros com mais peso quando comparado ao MAE (Equação 31); V) Raiz do erro quadrático médio (RMSE, do inglês *Root Mean Squared Error*) bivariado, que representa o erro padrão do modelo, na mesma unidade dos dados observados (Equação 32) (MORETTIN; SINGER, 2025). Dentre os dados obtidos, há os valores observados (O_i), ou seja, dados de umidade pelo método tradicional (termogravimétrico) e preditos (P_i), isto é, valores obtidos pela curva de calibração (modelo) da tensão elétrica em função da umidade volumétrica do solo.

As Equações 28, 29, 30, 31 e 32 representam as métricas estatísticas do SD, R^2 , MAE, MSE e RMSE, onde n é o número de observações, O_i e P_i são os valores observados e previstos, respectivamente, e $\bar{O}$ é a média dos valores observados. Os resultados das análises estatísticas estão apresentados no Capítulo 4.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (28)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (29)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_i - O_i| \quad (30)$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2 \quad (31)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2} \quad (32)$$

As equações da calibração de cada solo estão presentes no capítulo 4, e foram obtidas por diversos métodos de ajustes, dentre as equações: I) linear; II) exponencial; III) polinomial de ordem 2. Todas elas levam em consideração o valor de tensão elétrica fornecida pelo sensor (V) em função da estimativa da umidade do solo observada (θ).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultado da Simulação para Construção Física

Os resultados apresentados nas Tabelas 11 e 12 foram obtidos a partir de simulações que avaliaram a melhor configuração de altura do anel e distância entre eles, considerando a maior amplitude de variação da capacitância. A simulação que apresentou a maior variação da capacitância ocorreu com distância de 30 mm entre as placas e altura de 30 mm. Essa amplitude de variação é fundamental para que o circuito eletrônico gere sinais de tensão com uma faixa maior de valores (range), resultando em maior sensibilidade da sonda. Em relação ao raio de atuação para detecção da umidade do solo, considerando a estrutura física da sonda, o alcance obtido foi de aproximadamente 50 mm a partir da borda do acrílico que envolve a sonda.

Tabela 11. Valores de capacitância (pF) em relação a distância entre os anéis de cobre com a permissividade da água.

Distância entre os anéis	Altura do anel		
	30 mm	20 mm	10 mm
5 mm	12,911	10,648	12,196
10 mm	11,455	9,179	8,412
15 mm	10,754	8,578	7,120
20 mm	10,294	8,236	6,512
25 mm	9,218	8,002	6,169
30 mm	6,112	7,817	5,581

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 12. Valores de capacitância (pF) em relação a distância entre os anéis de cobre com a permissividade do ar.

Distância entre os anéis	Altura do anel		
	30 mm	20 mm	10 mm
5 mm	10,916	10,751	10,406
10 mm	6,681	6,537	6,258
15 mm	5,003	4,995	4,744
20 mm	4,186	4,154	3,938
25 mm	3,639	3,608	3,415
30 mm	3,050	2,981	2,786

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.2. Confeção da Placa Eletrônica em SMD

Para a confecção do primeiro protótipo, foi elaborada uma placa em SMD (Figura 40) baseada na placa construída em fenolite. A redução do tamanho da placa de fenolite tornou-se necessária para seu acoplamento no interior do segmento da sonda. A instalação da placa dentro do segmento, junto com todos os condutores elétricos, pode ser visto na Figura 42 (a).

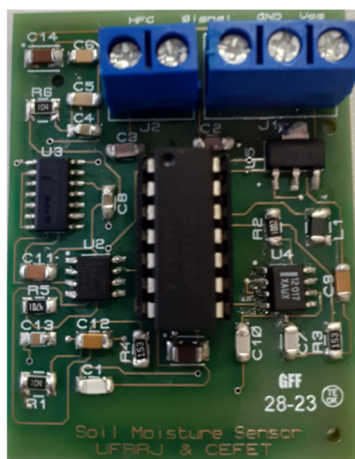
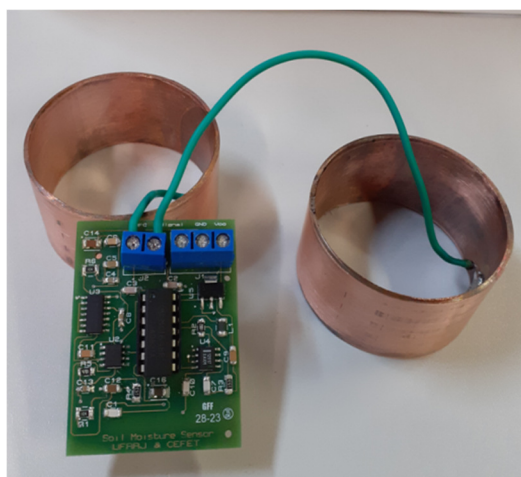


Figura 40. Placa eletrônica para construção do protótipo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.



(a)



(b)

Figura 41. Construção do protótipo: a) Estrutura física de resina; (b) ligação dos anéis de cobre com a placa eletrônica. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

4.3. Construção de um Segmento

Para a construção de um segmento, foram adotados os resultados da simulação Seção 5.1, em conjunto com a placa eletrônica produzida em SMD (Figura 40). A finalização da montagem do segmento inclui a inserção da placa eletrônica no interior da estrutura, a ligação do cabeamento entre a placa e os anéis de cobre, bem como a conexão dos cabos de energia elétrica e de envio de dados ao microcontrolador. O segmento completo, encapsulado pelo acrílico de proteção e pronto para inserção direta no solo, está mostrado na Figura 42(b). Uma vez consolidado o segmento e realizada sua calibração em laboratório, a etapa seguinte consistiu na montagem da sonda multissegmentada (Figura 45), seguida da sua integração ao painel eletrônico e instalação em campo.

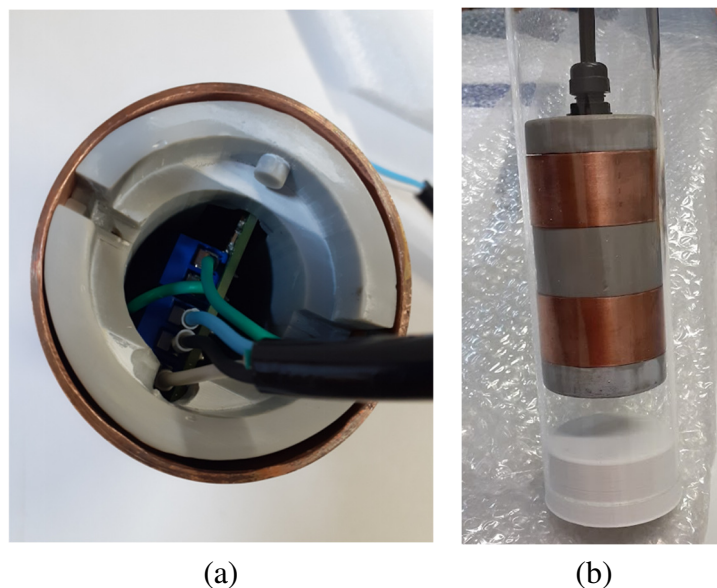


Figura 42. Construção do protótipo: (a) Inserção da placa eletrônica no protótipo; (b) Protótipo com estrutura completa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

4.4. Construção da Sonda Multisegmentada

A sonda multisegmentada é composta por três segmentos distribuídos em série, permitindo a estimativa da umidade do solo em diferentes profundidades. Os segmentos são interligados por uniões ajustáveis, possibilitando a configuração da profundidade da sonda de acordo com as necessidades específicas de cada aplicação.



Figura 43. Montagem da sonda segmentada. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

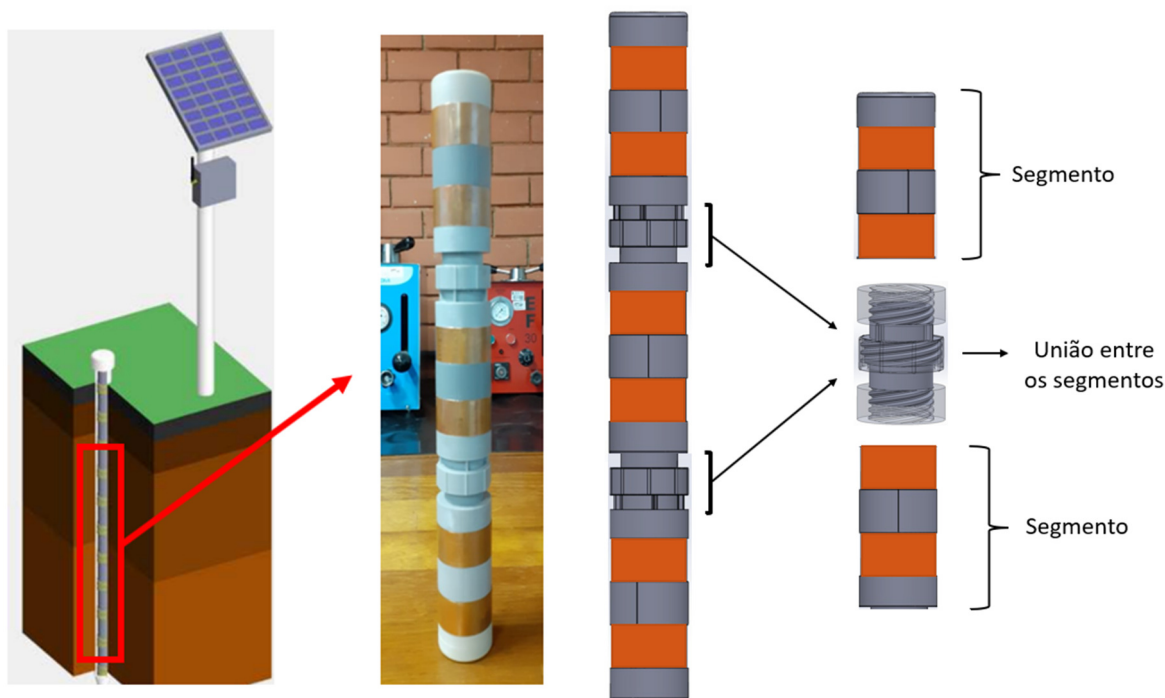


Figura 44. Sonda segmentada com sistema de montagem dos segmentos. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

Conforme apresentado na Figura 44, a sonda possui três segmentos e duas uniões. Nessa configuração, as profundidades alcançadas para a estimativa da umidade do solo correspondem aproximadamente a 10, 30 e 50 cm. Cada segmento da sonda mede cerca de 13 cm, enquanto cada união possui aproximadamente 4 cm, resultando em uma estrutura física total de 47 cm (Figura 45).



Figura 45. Sonda segmentada montada. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

4.5. Resultados Preliminares da Placa Eletrônica de Fenolite

Durante a simulação feita pelo protótipo da placa eletrônica, observou-se que com o aumento dos valores das capacitâncias ($C_{auxiliar}$ e C_{sonda}) o erro relativo das medições foi atenuado. Esse erro relativo foi calculado pelo módulo da subtração entre o valor aproximado e o valor real, dividido pelo valor real. Esses erros surgem da própria incerteza intrínseca dos componentes presentes na placa. Os capacitores e resistores utilizados possuem uma incerteza de aproximadamente 1 % conforme a folha de dados fornecida pelos fabricantes. Os gráficos apresentados com base na Tabela 11, avaliam os valores calculados e os obtidos experimentalmente em cada componente do circuito eletrônico. As simulações foram estipuladas conforme apresentado na Tabela 8, utilizando a variação dos valores $C_{auxiliar}$ de 10, 56 e 100 pF, correlacionados com todos os valores da capacitância que simulará a sonda C_{sonda} . Além disso, a Figura 47 mostra o resultado do erro relativo em porcentagem dos valores de tensão oriundos do conversor LM331. A escolha pela sua verificação é devido a necessidade do envio dos sinais de tensão elétrica ao microcontrolador para posterior transmissão via LoRa. Na Tabela 13, as abreviações “Cal.” e “Exp.” correspondem respectivamente aos valores calculados e as leituras experimentais. Já nas Figuras 46 e 47, observa-se o comportamento com componentes eletrônicos que obtiveram menor erro relativo. As demais Tabelas e Figuras encontram-se no Apêndice.

Tabela 113. Valores da simulação da placa eletrônica com $C_{auxiliar}$ 100 pF.

C_{sonda} (pF)	VCO (MHz)		Prescaler (kHz)		Contador Binário (Hz)		Conversor (mV)		Erro Relativo Conversor
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	(%)
2,5	4,97	4,63	77,72	71,15	303,59	277,77	198	186	6,06
5,0	4,92	4,59	76,91	70,56	300,43	275,66	196	184	6,12
7,5	4,87	5,55	76,19	69,68	297,63	272,31	195	183	6,15
10	4,83	4,50	75,55	69,59	295,13	271,77	193	181	6,22
12,5	4,79	4,48	74,98	69,19	292,88	270,20	191	180	5,76
15	4,76	4,46	74,46	68,75	290,86	268,63	190	179	5,79
17,5	4,73	4,43	73,99	68,38	289,02	267,09	189	179	5,82
20	4,70	4,41	73,56	67,84	287,34	265,15	188	177	5,85
22,5	4,68	4,39	73,16	67,82	285,80	265,00	187	176	5,88
25	4,65	4,38	72,80	67,75	284,39	264,97	186	175	5,91
27,5	4,63	4,37	72,47	67,24	283,09	262,74	185	174	5,95
30	4,61	4,33	72,16	66,60	281,83	260,13	184	173	5,98
32,5	4,60	4,31	71,87	65,90	280,77	258,75	183	172	6,01
35	4,58	4,27	71,61	65,18	279,73	257,64	183	171	6,56
47	4,51	4,26	70,55	65,00	275,60	256,54	180	169	6,11
56	4,47	4,22	69,94	64,90	273,21	254,22	179	168	6,15
68	4,43	4,18	69,28	64,42	270,65	251,64	177	167	5,65
78	4,40	4,15	68,86	64,08	268,93	250,31	176	166	5,68
100	4,35	4,11	68,10	63,57	266,03	248,27	174	164	5,75

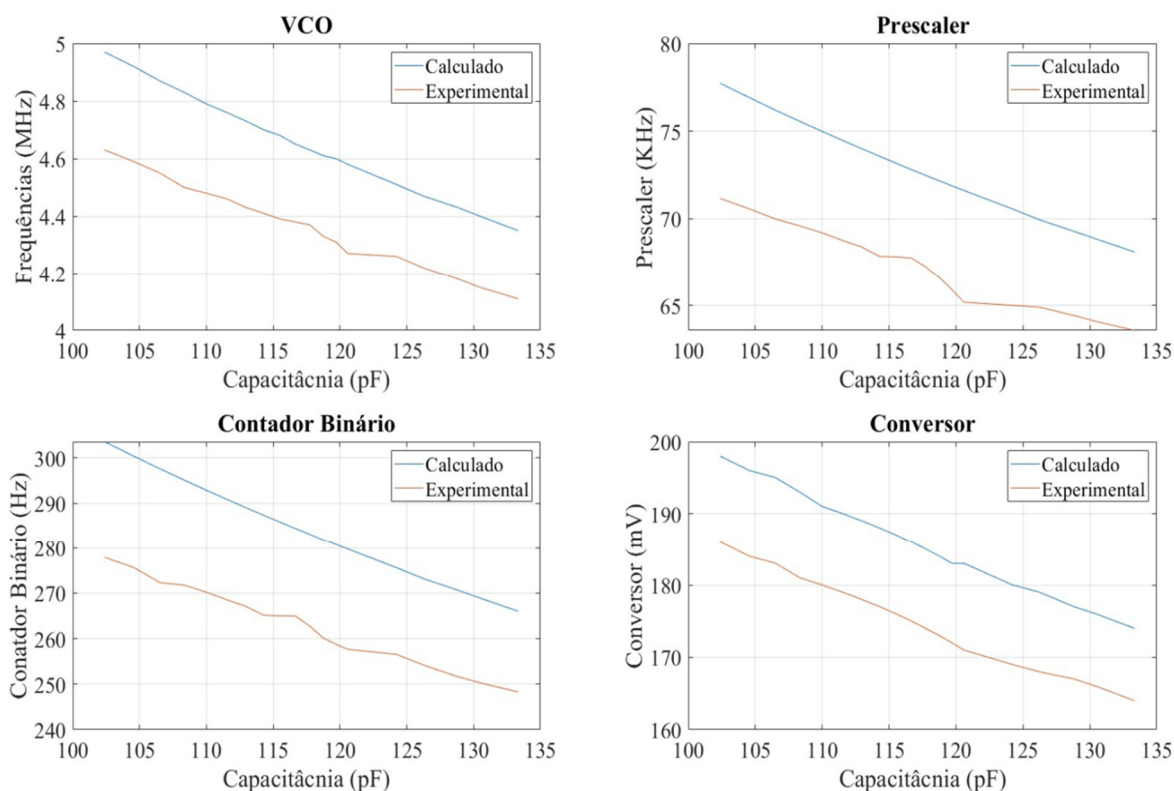


Figura 46. Valores calculados e experimentais dos componentes do protótipo da placa eletrônica, utilizando $C_{auxiliar}$ de 100 pF. Fonte: Elaborado pelo Autor.

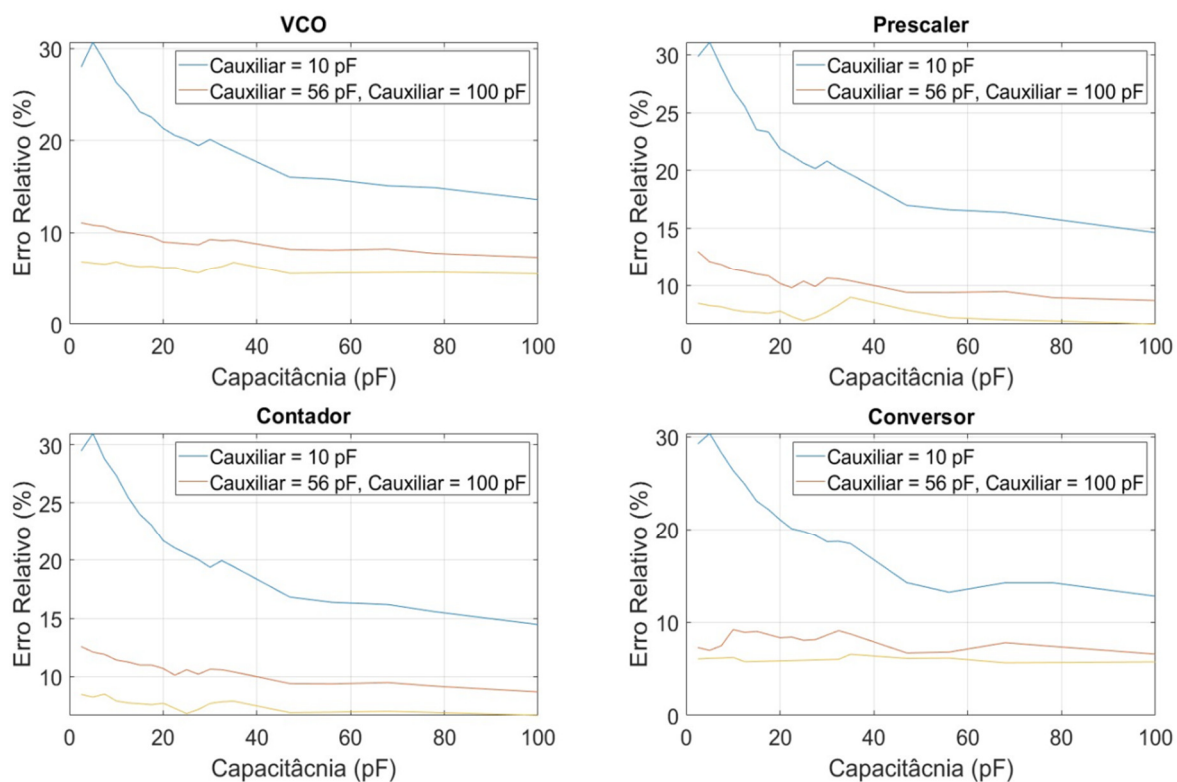


Figura 47. Erros relativos dos componentes da placa em função da $C_{auxiliar}$. Fonte: Elaborado pelo Autor.

O resultado da simulação dos valores variados de capacitância, evidenciou que a configuração entre C_{sonda} e $C_{auxiliar}$ com valores respectivamente 68 e 100 pF apresentaram o menor valor de erro relativo, ou seja, 5,65%. Dessa forma, esses valores foram escolhidos para serem inseridos na placa eletrônica em SMD (Figura 40).

4.6. Resultados da Eficiência Energética do Sistema

Para analisar empiricamente a eficiência energética, avaliou-se o comportamento do sistema variando o intervalo de envio dos dados, em associação com as condições meteorológicas correspondentes. Os dados obtidos estão compilados na Tabela 14.

Tabela 124. Eficiência energética em função dos dados meteorológicos.

Intervalos (dias)	Temperatura média (°C)	Umidade média do ar (%)	Radiação média (KJ/m ²)	Chuva média (mm)	Intervalo de envio	Duração da bateria (dias)
30/06 a 03/07	20,07	84,97	606,80	0,10	10 seg.	3
04/07 a 09/07	18,30	80,56	1076,72	0,01	10 min.	5
10/07 a 17/07	19,18	77,86	1138,69	0,00	20 min.	7
18/07 a 26/07	19,77	78,40	1024,97	0,11	30 min.	8

Fonte: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). seg. – segundos; min. – minutos.

Levando em consideração os dados meteorológicos do Tabela 14, os meses de junho e julho possuem radiação média menor que 1200 KJ/m². A radiação é uma variável primordial para carregamento do sistema em virtude das placas fotovoltaicas e a bateria. Com o auxílio dos dados fornecidos pelo INMET, os meses de janeiro, fevereiro e março, possuem valores radiação média 1561 KJ/m² bem acima dos dias nos quais os testes foram realizados, isso significa que a recarga da bateria se torna mais eficiente, assim, como sua duração.

4.7. Análise de Desempenho da Distância em Função da Potência do Sinal (LoRa)

A potência do sinal transmitido entre o TTGO transmissor e o TTGO receptor pode variar em função da distância e dos obstáculos físicos presentes entre eles. Para avaliar essa potência, utilizou-se a métrica RSSI (do inglês Received Signal Strength Indicator), fornecida pelo módulo de comunicação LoRa embarcado no TTGO. A unidade do RSSI é decibéis por miliwatt (dBm), sendo que quanto mais negativo o valor, menor a potência do sinal. A relação entre a potência do sinal e a distância pode ser observada na Figura 48. Nela, o triângulo vermelho indica a localização da sonda multissegmentada em relação ao Gateway do Instituto de Agronomia. Embora valores semelhantes de potência (-120 dBm) tenham sido registrados para distâncias superiores a 642 m, a presença de vegetação e outros obstáculos resultou em perda de pacotes de dados (erros nas mensagens). Dessa forma, a distância máxima sem ocorrência de perda de pacotes foi de 642 m.

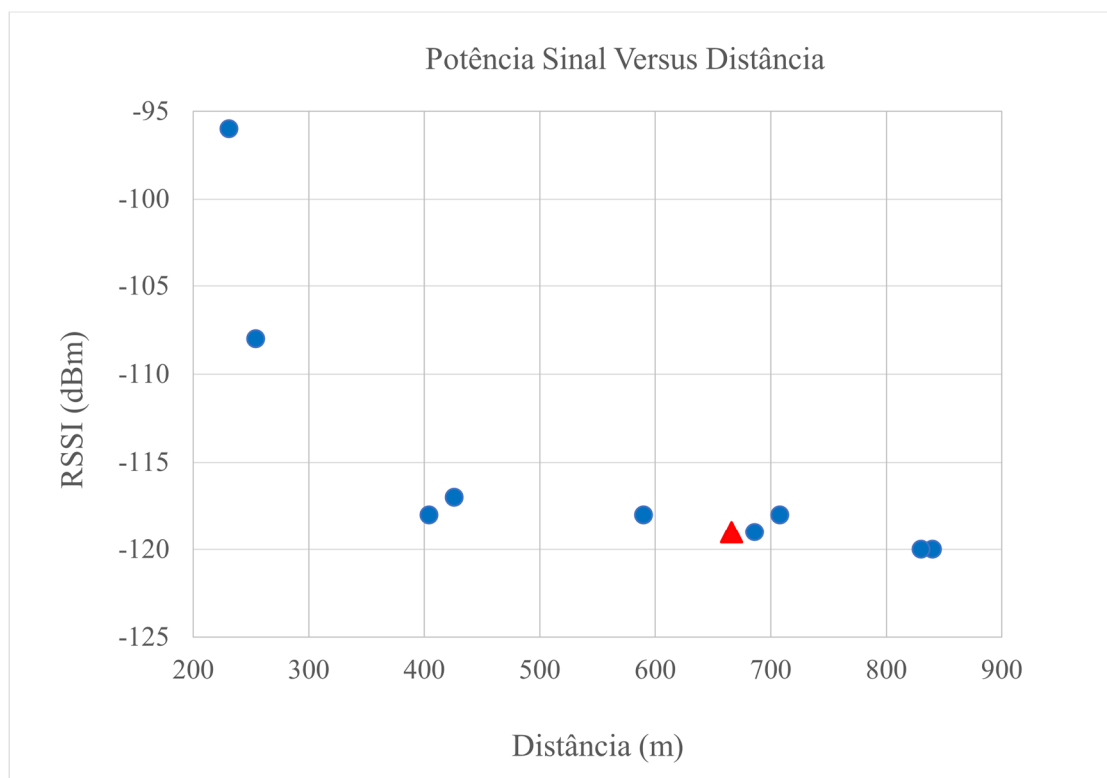


Figura 48. Potência do sinal em função da distância. Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.8. Resultados da Calibração em Laboratório

Nas Tabelas 15 e 16 estão apresentados os resultados das análises físicas e químicas dos solos calibrados em condições de laboratório. No que se refere às análises físicas (Tabela 15), a partir das porcentagens de areia, silte e argila, foi possível caracterizar a classe textural de cada solo. Os solos calibrados apresentaram as seguintes classes: areia franca, argiloarenosa, argila e solo de constituição orgânica.

Os elementos químicos, assim como a quantidade de carbono e a condutividade elétrica, influenciam diretamente a dinâmica da estimativa da umidade do solo realizada pela sonda. Na Tabela 15 também são apresentados os valores médios das densidades do solo e da partícula, considerando duas calibrações realizadas em vasos distintos (sonda 1 e sonda 2). No solo de classe argila, observou-se maior divergência nos valores de densidade do solo e da partícula, possivelmente relacionada ao tempo de assentamento do solo durante a montagem dos vasos.

Na Tabela 16 são apresentados os dados da análise química dos solos. Destaca-se o solo de constituição orgânica, que apresentou saturação de bases e condutividade elétrica superiores aos demais solos. Esses resultados provavelmente decorrem da calagem e adubação realizadas nesses solos, que historicamente receberam cultivo intensivo de olerícolas e fruteiras.

Na Tabela 17 são apresentadas para cada tipo de solo, as equações dos modelos de calibração ajustados e respectivos parâmetros de acurácia das curvas de calibração considerando o conjunto de dados de tensão elétrica com o solo umedecendo e secando. Os resultados mostram que o sistema sensor desenvolvido é sensível e acurado (erro médio absoluto da umidade volumétrica – Θ em torno de 3%). Os resultados indicam que o sistema é promissor para apoio à decisão em diferentes aplicações, como sistemas de irrigação e monitoramento de risco de deslizamento de encostas, taludes de estradas e barragens.

Os dados evidenciam a necessidade de calibração específica para cada tipo de solo, uma vez que a estimativa da umidade do solo varia conforme atributos como textura, porosidade e teor de matéria orgânica. Dessa forma, um mesmo valor de tensão elétrica fornecido pela sonda

pode corresponder a diferentes estimativas de umidade, dependendo do tipo de solo. Por exemplo, um valor de tensão elétrica pode representar uma estimativa de umidade em um solo argiloso que difere significativamente daquela obtida em um solo arenoso.

Ao tentar construir uma curva de calibração universal, utilizando todos os dados de diferentes solos, observou-se um aumento significativo no RMSE e uma redução no coeficiente de determinação (R^2), evidenciando a perda de precisão do modelo quando a variação de atributos dos solos não é considerada.

Os gráficos da variação da tensão elétrica em função da umidade do solo correspondente aos modelos de calibração da Tabela 15 estão apresentados nas Figuras 50, 51, 52, 53 e 54. Neles, os valores de umedecimento do solo (terra fina seca ao ar até saturação) estão representados na cor azul. Já os dados de secagem do solo estão representados pelos pontos em vermelho.

Tabela 15. Análise física dos solos calibrados em condição de laboratório.

Areia	Silte	Argila	C.T	Dp	Ds_1	Ds_2	Ds_M	Pt_1	Pt_2	Pt_M
	%		adm		kg dm ⁻³				%	
85,7	4,3	10,1	Areia franca	2,66	1,37	1,37	1,37	48,5	48,5	48,50
48,1	1,6	50,4	Argiloarenosa	2,66	1,10	1,08	1,09	58,6	59,4	59,0
41,7	11,5	46,8	Argila	2,50	1,19	1,05	1,12	52,4	60,5	56,45
75,8	8,8	15,5	Orgânico	2,31	0,86	0,86	0,86	62,60	62,60	62,60

C.T – Classe textural; C- Carbono orgânico; Dp - Densidade das partículas; Ds_1 - Densidade do solo do Vaso_1; Ds_2 - Densidade do solo do Vaso_2; Ds_M - Densidade do solo Média; Pt_1 – Porosidade no vaso_1; Pt_2 – Porosidade no vaso_2; Pt_M – Porosidade Média; adm – adimensional.

Tabela 16. Análise química dos solos calibrados em condição de laboratório.

C.T	C	pH	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺	K ⁺	Na ⁺	H+Al	P	S	T	V	C.E
adm	g kg ⁻¹				cmolc kg ⁻¹				mg kg ⁻¹		cmolc kg ⁻¹		(dS/m) 25°c
Areia franca	2,13	4,3	0,23	0,83	0,39	0,01	0,23	1,66	14,30	1,39	3,05	45,56	0,0022
Argiloarenosa	1,95	4,2	0,33	0,30	1,89	0,09	0,25	4,41	10,14	0,97	5,38	18,02	0,0041
Argila	2,50	4,7	4,40	1,53	0,19	0,64	0,26	4,49	23,18	6,82	11,31	60,30	0,0023
Orgânico	96,55	5,3	16,83	7,35	0,27	1,58	0,74	18,38	61,32	26,50	44,88	59,04	0,0265

C.T – Classe textural; adm – adimensional; C- Carbono orgânico; S – Soma de cátions trocáveis; T – Capacidade de troca de cátions; V – Percentagem de troca de bases; C.E – Condutividade elétrica.

Tabela 137. Ajuste de calibração para diversos solos em condição de laboratório.

C.T	Modelo	Equação	SD	MAE	R ²	MSE	RMSE
Areia franca	Linear	-0,547V+1,7676	0,06	0,016	0,93	0,0004	0,0204
Argiloarenosa	Linear	-0,8111V+2,5274	0,07	0,015	0,95	0,0004	0,0187
Argila	Linear	-0,7383V+2,305	0,10	0,029	0,90	0,0013	0,0362
Orgânico	Polinomial	0,5898V ² -4,0797V+6,9695	0,09	0,036	0,92	0,0016	0,0400
Todos as Classes Juntas	Polinomial	0,8457V ² -5,4679V+8,8876	0,09	0,042	0,77	0,0021	0,0447

Fonte: Elaborado pelo Autor. C.T – Classe Textural; SD - Desvio Padrão (cm³/cm³); MAE - Erro médio Absoluto (cm³/cm³); R² - Coeficiente de determinação; MSE – Erro médio quadrático; RMSE – Raiz do erro quadrático médio (cm³/cm³).

Na coluna Equação da Tabela 17, os valores de V correspondem à variação da tensão elétrica (V) em função da umidade do solo (θ). Os resultados indicam que, ao considerar todos os dados para a construção de uma curva de calibração universal, o modelo polinomial quadrático apresentou o ajuste mais satisfatório. Da mesma forma, o solo de constituição orgânica também foi mais bem representado por um modelo quadrático. Já os demais solos obtiveram ajuste por polinômio de primeira ordem, ou seja, uma equação linear. Optar pelo polinômio de primeira ordem é vantajoso do ponto de vista de programação, devido ao menor custo computacional. Polinômios de grau mais elevado aumentam o gasto de memória e tornam o sistema mais suscetível a erros numéricos, devido a arredondamentos e à resolução de raízes complexas (BINI; PAN, 1986).

Ainda com base na Tabela 17, os solos argiloso e de constituição orgânica foram os que apresentaram maiores desvios em relação à média em função dos dados de umidade. Por consequência, apresentaram menores valores de coeficiente de determinação (R²). Solos argilosos e orgânicos contêm altos teores de coloides, e essa característica podem interferir na leitura de tensão da sonda de forma a obter uma superestimativa dos valores da umidade do solo.

Tabela 18. Valores máximos e mínimos da umidade do solo e da tensão elétrica dos solos em condição de laboratório.

C.T	Mín. Umidade	Máx. Umidade	Amp. Umidade	Mín. TE	Máx. TE	Amp. TE
adm	%			V		
Areia franca	5,0	30,9	25,9	2,735	3,104	0,369
Argiloarenosa	17,2	47,4	30,2	2,599	2,890	0,291
Argila	3,7	44,0	40,3	2,598	3,052	0,454
Orgânico	2,2	45,1	42,9	2,541	2,988	0,447
Todas as Classes Juntas	2,2	47,4	45,2	2,541	3,104	0,563

C.T – Classe textural; Máx. – Máximo; Mín. – Mínimo; Amp. – Amplitude; TE – Tensão Elétrica.

Na Tabela 18, são apresentados os valores máximos e mínimos da umidade do solo, bem como a tensão elétrica correspondente, para os solos calibrados em condição de laboratório. Os solos com maior teor de argila (classes texturais argiloarenosa e argila), assim como o solo orgânico, atingiram valores de umidade mais elevados. Isso ocorre devido à maior concentração de partículas carregadas, característica desses solos, que interagem fortemente com as moléculas de água por efeito de adsorção.

Entretanto, apenas o solo argiloarenoso apresentou uma umidade residual relativamente alta (17,2%), enquanto os demais solos tiveram umidade residual inferior a 6%. Considerando que a calibração desses solos foi realizada em dias diferentes, a diferença observada na umidade

residual do solo argiloso pode estar relacionada ao tempo de espera durante o procedimento de drenagem.

Os gráficos obtidos a partir da calibração dos solos em condição de laboratório estão apresentados nas Figuras 50, 51, 52, 53 e 54. Através dessas figuras é possível observar um comportamento de histerese entre o processo de umedecimento e secagem. A histerese é um fenômeno físico, onde ocorrer uma diferença entre leitura/medida de um valor da grandeza medida quando ela for submetida a valores crescentes e decrescente dessa grandeza (WALKER et al., 2014). No que se refere à retenção de água no solo, a histerese é um fenômeno amplamente reportado na literatura para explicar a relação entre o potencial matricial e as curvas características de umidade durante os processos de umedecimento (sorção) e secagem (dessorção) do solo.

Em relação ao conteúdo de água no solo e ao potencial matricial, esse fenômeno está intrinsecamente ligado aos seguintes aspectos:

I) distribuição espacial não uniforme em relação ao tamanho e formato dos poros. Portanto; ao iniciar o processo de umedecimento, os macroporos são os primeiros a serem preenchidos seguidos dos microporos. Contudo, no processo de secagem, os macroporos são os primeiros a sofrerem a drenagem seguidos dos microporos que retêm mais água devido ao efeito da capilaridade. Em relação ao formato, poros que apresentam ângulos em formato de fenda (formato triangular) ao serem drenados, uma fração de água fica retida nessas fendas por capilaridade, conseqüentemente, retêm mais água que os poros nos formatos hexagonais e circulares (TULLER et al., 2004).

II) A tangente que surge da interface entre líquido-gás no ponto de intersecção com a superfície do sólido, formam um ângulo (α) denominado ângulo de contato (Figura 48). Assim sendo, havendo espalhamento completo do líquido sobre a superfície sólida, o ângulo de contato do líquido com a superfície será igual a 0° . Da mesma forma, verifica-se que um ângulo de contato com valor de 180° equivale à rejeição total do líquido pela superfície. No solo há vários espaços de diferentes tamanhos e formatos. Logo, quando a água se aloja nesses capilares formam-se meniscos de todas as formas. A diferença de pressão (P_w) por meio da interface água/ar de um menisco em um tubo capilar é expressa conforme a Equação 33.

$$P_w = \frac{2\gamma \cos \alpha}{r'} \quad 33$$

Observando a Equação 33, tem-se que:

γ é a tensão superficial da água, α é o ângulo de contato da água com a superfície sólida; r' é o raio de curvatura do tubo.

Portanto, o ângulo de contato entre a gota de água e a superfície da partícula do solo, ou seja, como a água interagem com os sólidos do solo formando ângulo de contato diferente, isso ocorre pois o ângulo de avanço (umedecimento, ou seja, um ângulo $> 90^\circ$) é diferente do ângulo de recuo (secagem, isto é, ângulo $< 90^\circ$). O formato do ângulo de contato modifica a energia de adesão da água às partículas do solo afetando diretamente o potencial matricial (MALGARINOS et al., 2014). O solo no processo de secagem ($\alpha < 90$ e maior valor de P_w) a água se encontra mais espalhada e aderida na superfície da partícula do solo similar ao apresentado na Figura 49.

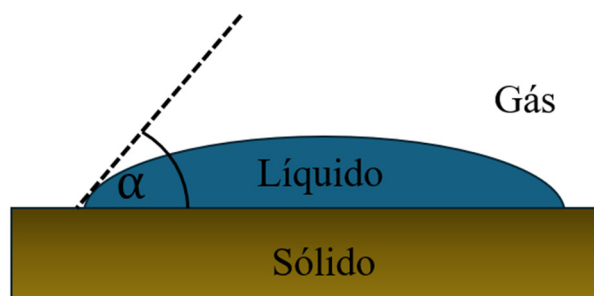


Figura 49. Ângulo de contato entre interfaces líquido-sólido-gás. Fonte: Adaptado de (REICHARDT; TIMM, 2012).

III) A histerese também está relacionada à contração e expansão do solo durante os processos de umedecimento e secagem, fenômeno típico em solos com alto teor de argila. Durante a expansão (umedecimento), as partículas de argila se afastam, resultando em aumento do volume do solo e redistribuição dos microsporos. Já durante a contração (secagem), ocorre perda de volume, surgimento de fissuras e macrofendas, e formação de poros maiores, o que dificulta a retenção de água. Todos esses efeitos da histerese podem gerar valores diferentes de tensão elétrica para o mesmo teor de umidade, dependendo se o solo está no processo de secagem ou umedecimento (Figura 49).

Como exemplo, a partir da Figura 50, tem-se que na umidade cujo percentual é próximo a 16,6% há valores de tensão elétrica diferentes, ou seja, 2,917 V (secando/dessorção) e 2,940 V (umedecendo/sorção). O mesmo acontece de forma evidente ao observar a umidade próxima de 12%, onde foram obtidos valores de tensão elétrica de 2,950 V (secando) e 3,040 V (umedecendo), reforçando o efeito da histerese na retenção de água no solo.

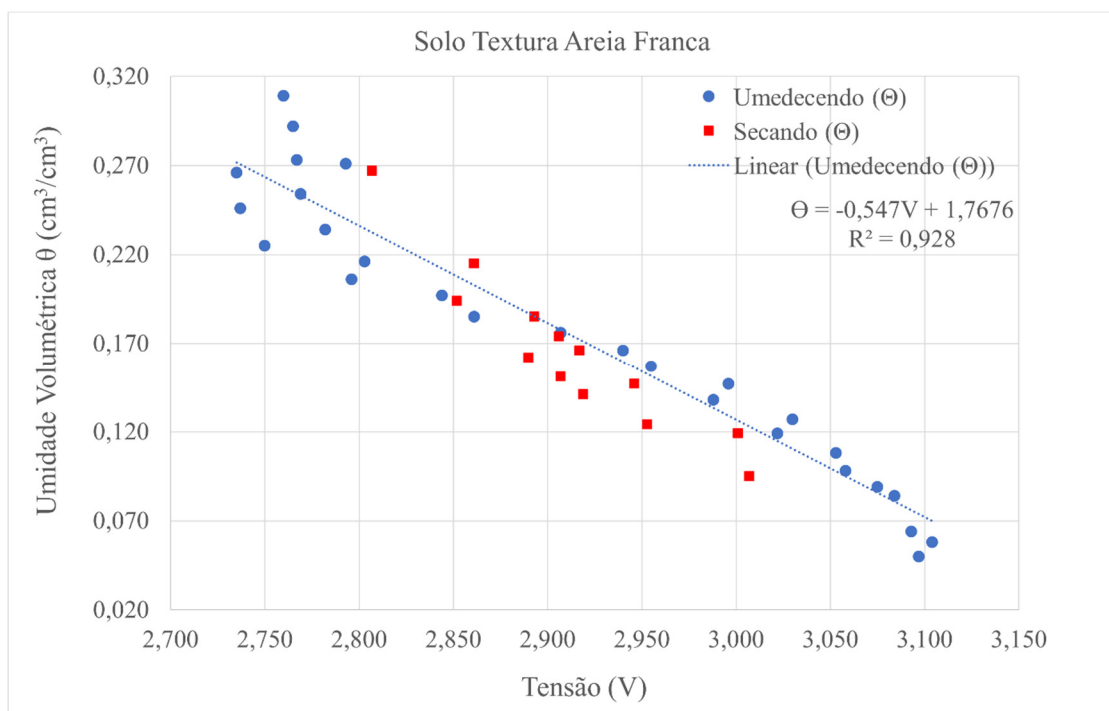


Figura 50. Curva de calibração para classe textural areia franca segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Nos solos com predominância de areia (Figura 50), observa-se que o efeito capilar dos poros é mais relevante do que a adsorção das moléculas de água. Já nas Figuras 51 e 52, onde há maior concentração de argila, predomina a adsorção em relação à capilaridade.

A retenção de água no solo está diretamente relacionada à capilaridade e à adsorção das moléculas de água na superfície das partículas do solo, tanto minerais quanto de matéria orgânica. Por consequência, os microporos de solos com maior teor de argila retêm mais água do que os macroporos de solos mais arenosos, característicos de solos com textura mais leve.

Apesar do efeito da histerese, os dados apresentados na Tabela 15, levando em consideração os dados observados e preditos para o solo de textura areia franca, obteve-se o menor valor de desvio padrão ($SD = 0,06$) dentre os solos calibrados em condição de laboratório. Já os valores de coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) são respectivamente: 0,93 e 0,0204.

O solo com textura argiloarenosa (Figura 51) apresenta o maior teor de argila (50,4%) entre os solos calibrados em condição de laboratório. Dessa forma, o efeito da histerese, associado à adsorção de água, torna-se mais evidente em comparação ao efeito da capilaridade. Ao analisar a Figura 51, observa-se que os valores de umidade do solo durante os processos de secagem e umedecimento apresentam maior correlação nas faixas de 32 a 17% de umidade. Entretanto, para valores acima de 35%, principalmente durante o processo de umedecimento, há maior divergência nos dados, indicando que as moléculas de água estão mais livres para se deslocar e interagir com as partículas do solo.

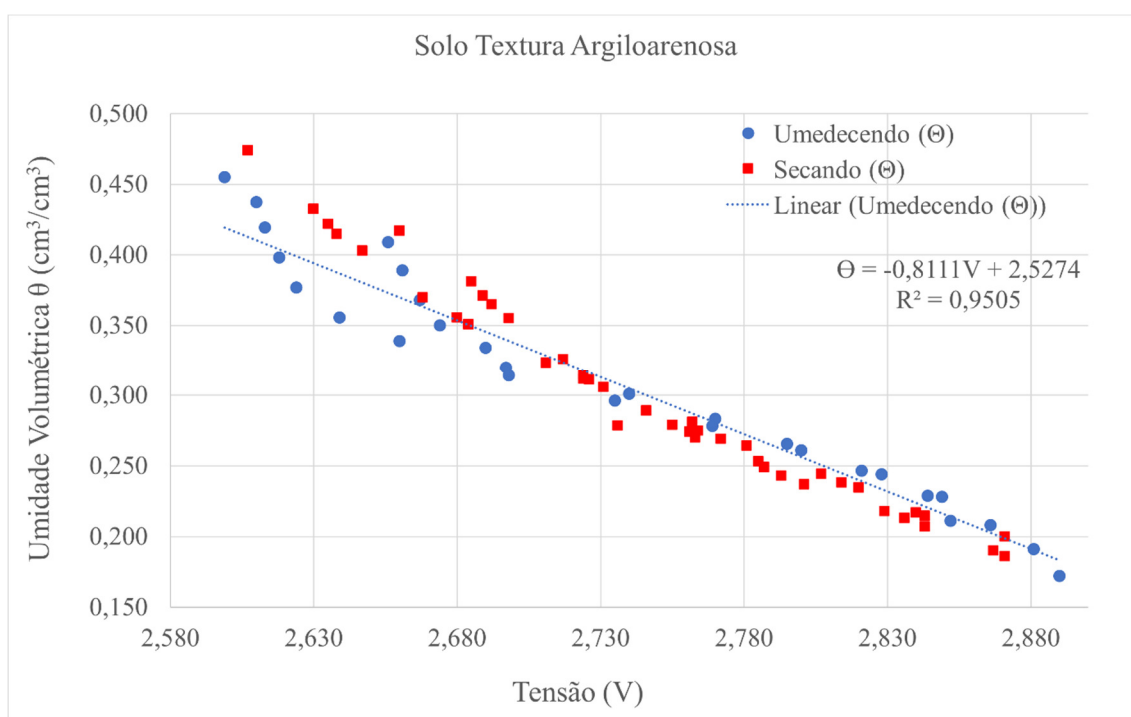


Figura 51. Curva de calibração para classe textural argiloarenosa segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados de umidade do solo presentes na Figura 51, conferem ao solo com textura argiloarenosa o maior valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,95$), e menor valor do raiz do erro quadrático médio ($RMSE = 0,0187$) dentre os solos calibrados em laboratório. Já o solo com de textura argila (Figura 52) apresentou um comportamento similar ao solo de textura argiloarenosa. Contudo, como nesse solo os valores de densidade do solo obtidos foram mais divergentes (vaso 1 = $1,19 \text{ kg/dm}^3$, vaso 2 = $1,05 \text{ kg/dm}^3$), ao inserir os valores de umidade no

mesmo gráfico (como feito nos demais) pode-se ocasionar uma percepção de maior discordância entre os valores estimados de umidade. Em decorrência disso, foi obtido o maior valor de desvio padrão ($SD = 0,10$) conferindo assim, um menor valor de coeficiente de determinação ($R^2 = 0,90$).

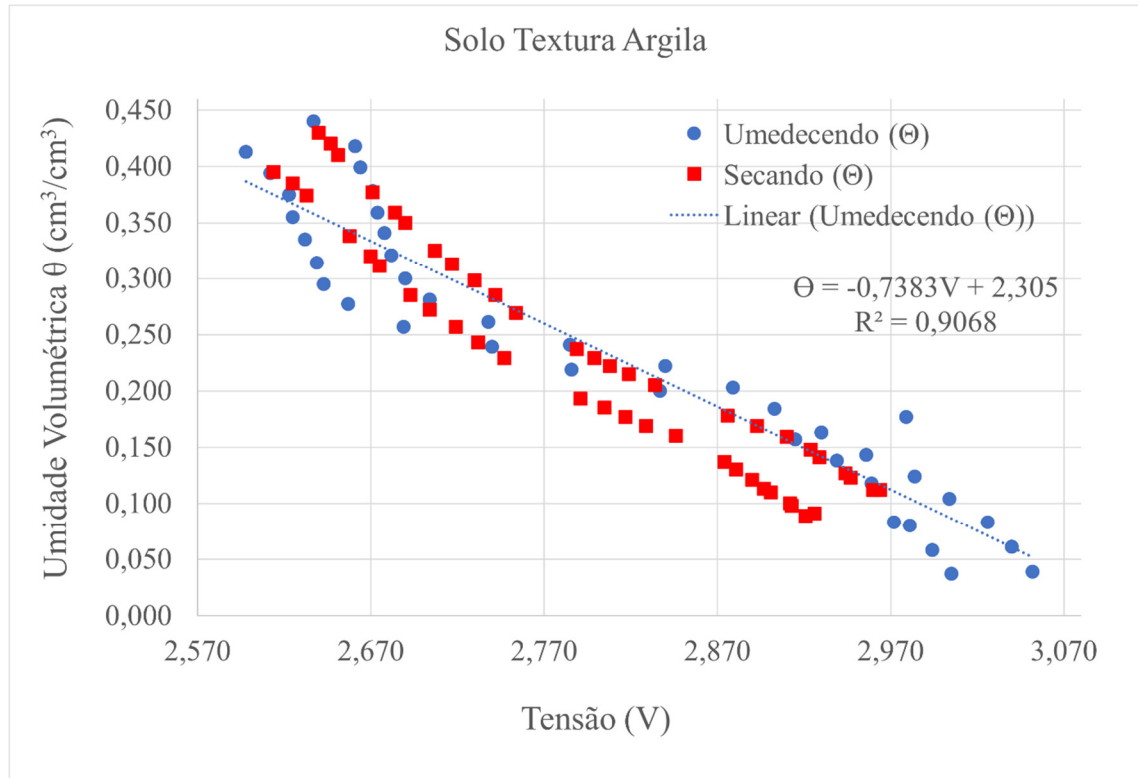


Figura 52. Curva de calibração para classe textural argila segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao analisar o solo orgânico (Figura 53), observa-se uma dispersão dos dados acima de 30% de umidade em ambos os processos, de secagem e umedecimento. Em particular, para 40% de umidade, verifica-se que para o mesmo valor de umidade existem dois valores de tensão elétrica distintos (2,550 V e 2,600 V), evidenciando o efeito da histerese.

Esse solo possui uma quantidade significativa de matéria orgânica, como indicado na Tabela 16, com valores de carbono orgânico superiores a 96 g/kg. Entre os solos calibrados em laboratório, apresenta a menor densidade do solo ($0,86 \text{ kg/dm}^3$) e maior porosidade (62,6%), favorecendo efeitos capilares.

Além disso, a alta superfície específica e a capacidade de troca de cátions do solo orgânico reforçam o efeito da adsorção, contribuindo para o aumento da condutividade elétrica ($0,0265 \text{ dS/m}$). Outro fator que influencia a histerese é a presença de grupamentos orgânicos hidrofóbicos, que aumentam o ângulo de contato da água com as partículas do solo, resultando em menor sucção e retenção diferenciada da água.

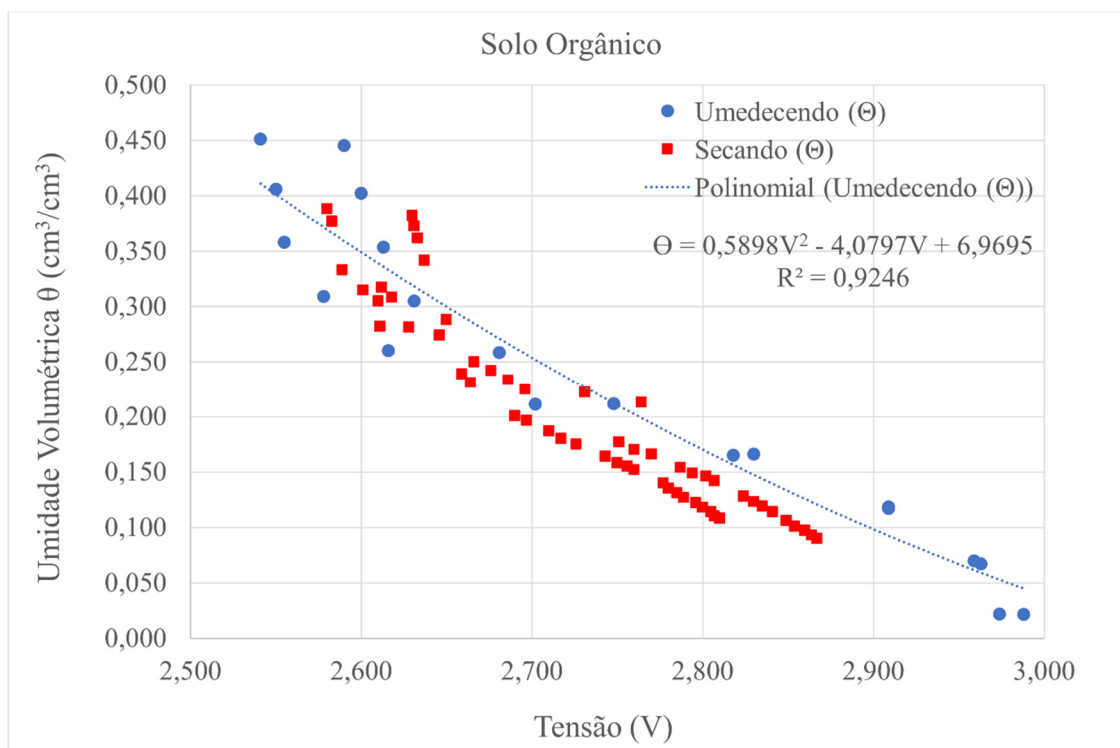


Figura 53. Curva de calibração para solo orgânico segmento de sonda em condição de laboratório. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Considerando a Tabela 17, o solo orgânico, diferente dos demais solos analisados, foi o único que obteve como modelo uma equação polinomial de segunda ordem, com coeficiente de determinação ($R^2 = 0,92$). Contudo, apresentou valores de erros (MSE e RMSE) acima dos demais solos analisados.

O resultado da análise utilizando todos os dados de umidade do solo está apresentado na Figura 54. Observa-se que, ao considerar todos os dados em conjunto, ocorre uma diminuição do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,77$) e um aumento do erro (RMSE = 0,0447), quando comparados aos valores obtidos para os solos analisados de forma individual. Esses resultados corroboram a necessidade de calibração in loco, pois a estimativa da umidade do solo depende das características específicas de cada solo, como textura, porosidade e teor de matéria orgânica.

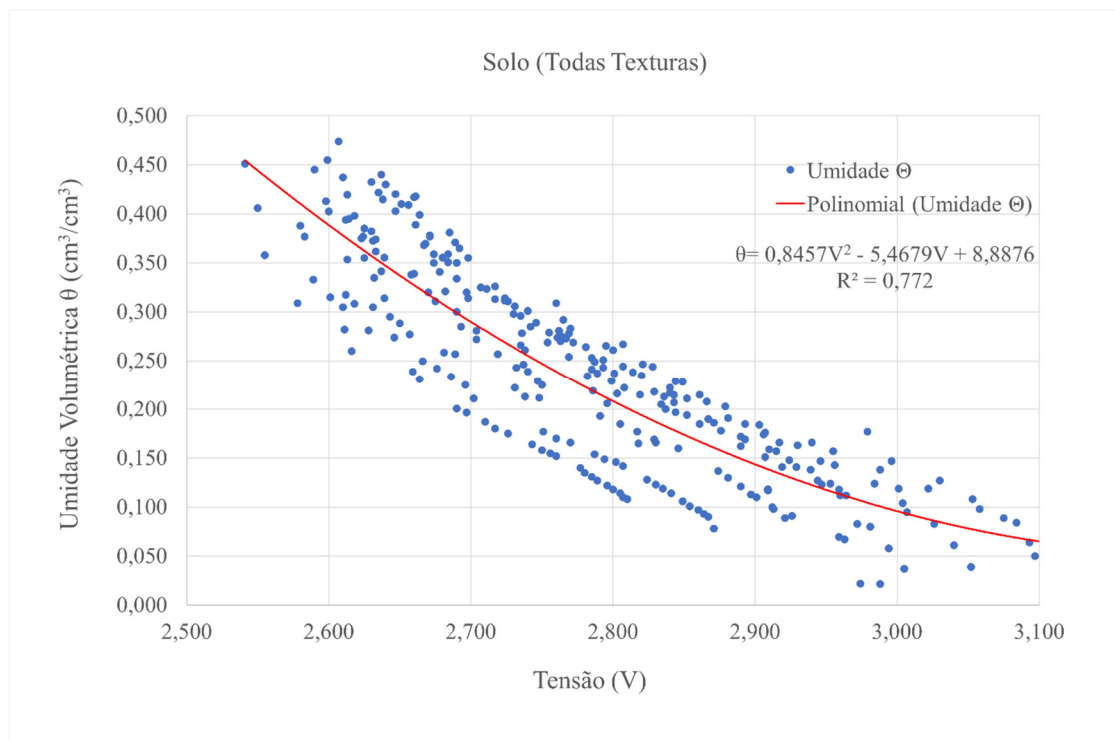


Figura 54. Curva de calibração com todos os solos juntos. Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.9. Resultados da Calibração em Campo

Os resultados das análises física e química do solo estão apresentados nas Tabelas 19 e 20. Na Tabela 21, encontram-se o ajuste do modelo de calibração e as análises estatísticas correspondentes. Por fim, na Tabela 22, estão registrados os valores mínimos, máximos e a amplitude da umidade do solo e da tensão elétrica para cada camada de solo onde a sonda multisegmentada foi instalada.

A Figura 55 apresenta a abertura da trincheira localizada ao lado do local de instalação do sensor. Nela foram coletadas amostras de solo para realização das análises física e química. Na Figura 55(a), observa-se a trincheira aberta, e na Figura 55(b), as camadas de solo de onde foram retiradas as amostras, alguns dias após a abertura da trincheira.



(a)



(b)

Figura 55. (a) Abertura da trincheira próximo da instalação do sensor; (b) Coleta das amostras para realizar as análises química e física da calibração em condição de campo. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

Tabela 149. Análise física do solo em condição de campo.

Profundidade	Areia	Silte	Argila	C.T	Dp	Ds	Pt
cm		%		adm	kg dm ⁻³		%
10	72,7	9,5	17,8	Areia franca	2,49	1,51	39,24
30	65,1	6,7	28,3	Franco-argiloarenosa	2,63	1,55	41,11
50	60,7	6,1	33,2	Franco-argiloarenosa	2,50	1,47	41,20

C.T – Classe textural; Dp - Densidade das partículas; Ds - Densidade do solo do Vaso; Pt – Porosidade total; adm – adimensional

Tabela 20. Análise química do solo calibrado em condição de campo.

Profundidade	C.S	C	pH	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Al ⁺	H+Al	C.E
cm	adm	g kg ⁻¹				cmolc kg ⁻¹		dS/m 25°C
10	Areia franca	1,77	5,42	1,25	0,92	0,26	1,89	0,264
30	Franco-argiloarenosa	2,87	5,06	0,92	0,46	0,48	1,37	0,120
50	Franco-argiloarenosa	1,75	5,21	1,05	0,60	0,35	0,86	0,128

C.S – Classe textural; C- Carbono orgânico; C.E – Condutividade elétrica; adm – adimensional.

Na Tabela 21, estão contidos os modelos de calibração em condição de campo. Apenas o solo Franco-argiloarenosa (50 cm) apresentou um modelo do tipo polinomial de primeira ordem (Equação da reta/Linear) em função do ajuste mais adequado para o coeficiente de determinação ($R^2 = 0,98$). Já os solos Areia franca (10 cm), Franco-argiloarenosa (30 cm) e com todos os dados juntos, tiveram o ajuste do modelo de calibração polinômio de segunda ordem, tendo como valor de coeficiente de determinação respectivamente 0,98, 0,94 e 0,79. Ainda analisando a Tabela 21, o solo de textura Franco-argiloarenosa na profundidade de 30 cm apresentou os erros mais elevados. Já o solo com textura Franco-argiloarenosa na profundidade de 50 cm, obteve os melhores resultados, tendo uma diminuição no desvio padrão ($SD = 0,04$) e nos erros quando comparado as demais camadas do solo.

Tabela 21. Ajuste de calibração para solo em condição de campo.

CS	Profund. (cm)	Modelo	Equação	SD	MAE	R^2	MSE	RMSE
Areia franca	10	Polinomial	$-1,6792V^2+8,019V-9,253$	0,05	0,006	0,98	0,00005	0,0073
Franco-argiloarenosa	30	Polinomial	$-5,9919V^2+28,264V-32,972$	0,05	0,012	0,94	0,00019	0,0139
Franco-argiloarenosa	50	Linear	$-0,6688V+1,9771$	0,04	0,004	0,98	0,00003	0,0058
Todas as Classes Juntas	-	Polinomial	$-1,070V^2+5,079V-5,7395$	0,04	0,016	0,79	0,0004	0,0200

CS – Classe textural; SD - Desvio Padrão; MAE - Erro médio Absoluto; R^2 - Coeficiente de determinação; MSE – Erro médio quadrático; RMSE – Raiz do erro quadrático médio. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Tabela 22, estão relacionados os valores mínimos, máximos e a amplitude dos dados obtidos da umidade e da tensão elétrica de classe textural correspondente a cada profundidade. O valor da umidade máxima alcançada na camada de 50 cm foi a menor (28%) devido ao processo de compactação da camada 30 cm, cujo valor da densidade do solo ($1,55 \text{ kg/dm}^3$), dificultou o processo de infiltração na camada de 50 cm.

Tabela 152. Valores máximos e mínimos da umidade do solo e da tensão elétrica dos solos em condição de campo.

CS adm	Profund. (cm)	Min. umidade	Máx. umidade	Amp. umidade	Min. TE	Máx. TE	Amp. TE
		%			V		
Areia franca	10	14,0	31,5	17,5	2,445	2,718	0,273
Franco-argiloarenosa	30	11,9	31,5	19,6	2,445	2,558	0,113
Franco-argiloarenosa	50	13,0	28,0	15,0	2,534	2,760	0,226
Todas as Classes Juntas	-	11,9	31,5	19,6	2,445	2,760	0,315

CS – Classe textural; adm: Adimensional; Máx. – Máximo; Min. – Mínimo; Amp. – Amplitude; TE – Tensão Elétrica.

Os gráficos das três camadas, onde foram estimados os valores de umidade, apresentaram uma concentração de umidade entre 20 e 25%. Esse comportamento está relacionado ao intervalo de monitoramento do experimento (duas semanas) e às características físicas e químicas de cada solo, que resultaram em curvas de calibração específicas.

Na Figura 54, observa-se a curva de calibração do solo com textura Areia franca na profundidade de 10 cm. O modelo de ajuste em relação aos dados observados e preditos foi polinomial de segunda ordem, apresentando coeficiente de determinação de $R^2 = 0,98$, e erro médio absoluto $MAE = 0,006$. Vale destacar que essa mesma classe textural, em condição de

laboratório, teve como ajuste de modelo um polinômio de primeira ordem, embora as proporções de areia, silte e argila sejam diferentes. Isso ratifica a necessidade da calibração in loco.

Com base na análise física do solo Areia franca, os teores percentuais de argila (17,8%) foram os menores, enquanto o percentual de areia (72,7%) foi o maior obtido entre as camadas analisadas.

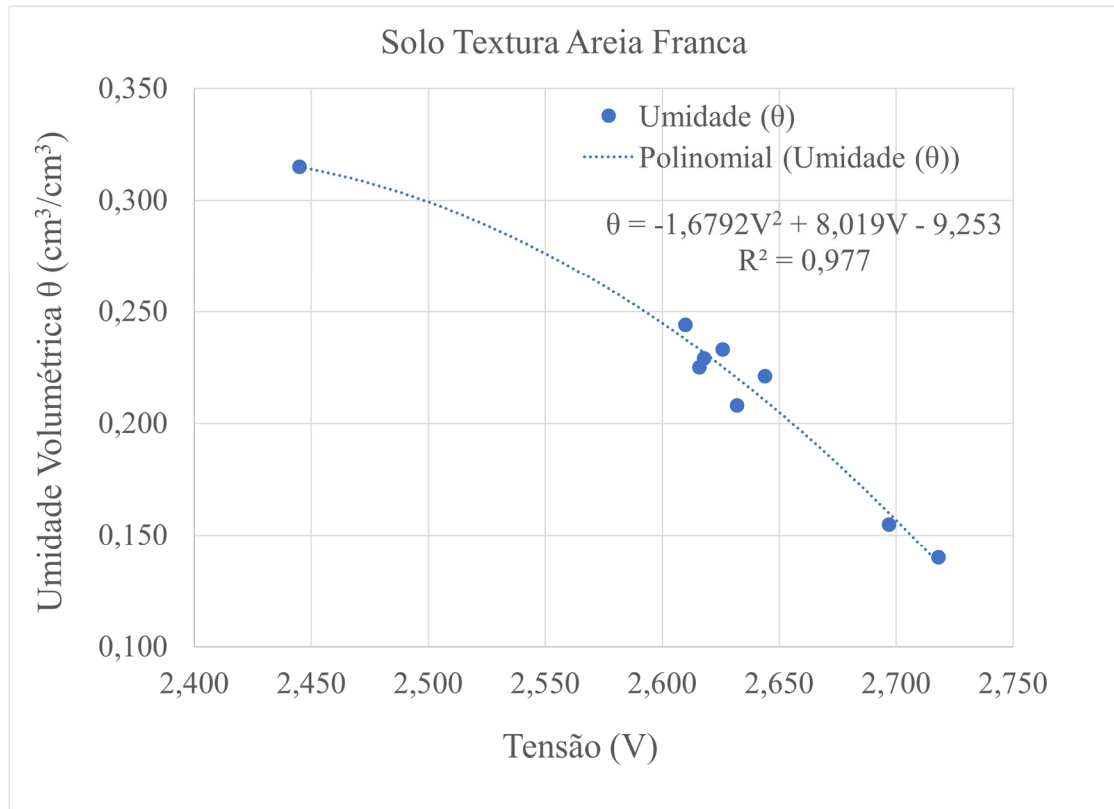


Figura 56. Curva de calibração para solo textura areia franca para sonda multissegmentada (10 cm) em condição de campo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dentre as camadas analisadas, o solo de textura Franco-argiloarenosa na profundidade de 30 cm apresentou um grau de compactação superior em relação às demais camadas, dificultando a infiltração da água na camada de 50 cm. Conforme observado na Tabela 20, a umidade máxima atingida nessa camada foi de 28%, valor inferior ao das camadas de 10 e 30 cm, que alcançaram 31,5%.

Com base na Figura 55, o ajuste do modelo para o solo Franco-argiloarenosa foi realizado utilizando um polinômio de segunda ordem, resultando em coeficiente de determinação de $R^2 = 0,94$ e raiz do erro quadrático médio $RMSE = 0,0139$.

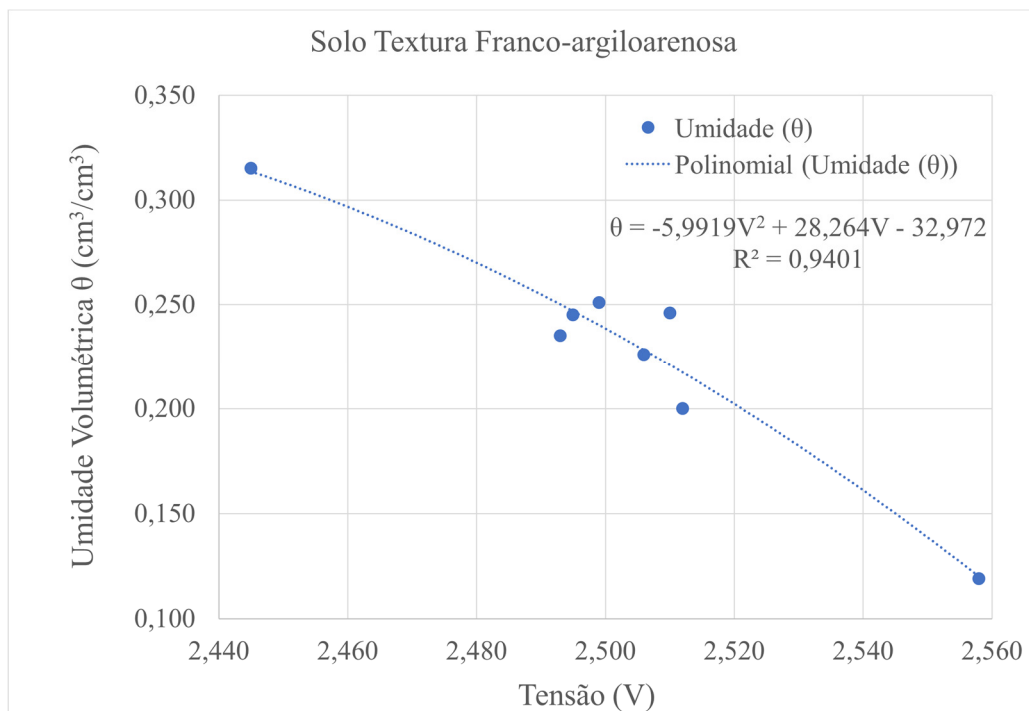


Figura 57. Curva de calibração para solo de textura Franco-argiloarenosa para sonda multisegmentada em condição de campo (30 cm). Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 56, o gráfico da umidade do solo com textura Franco-argiloarenosa em 50 cm, teve como melhor ajuste do modelo de calibração um polinômio de primeira ordem, com coeficiente de determinação ($R^2 = 0,98$) e o menor erro médio absoluto (MAE = 0,004) dentre os solos analisados.

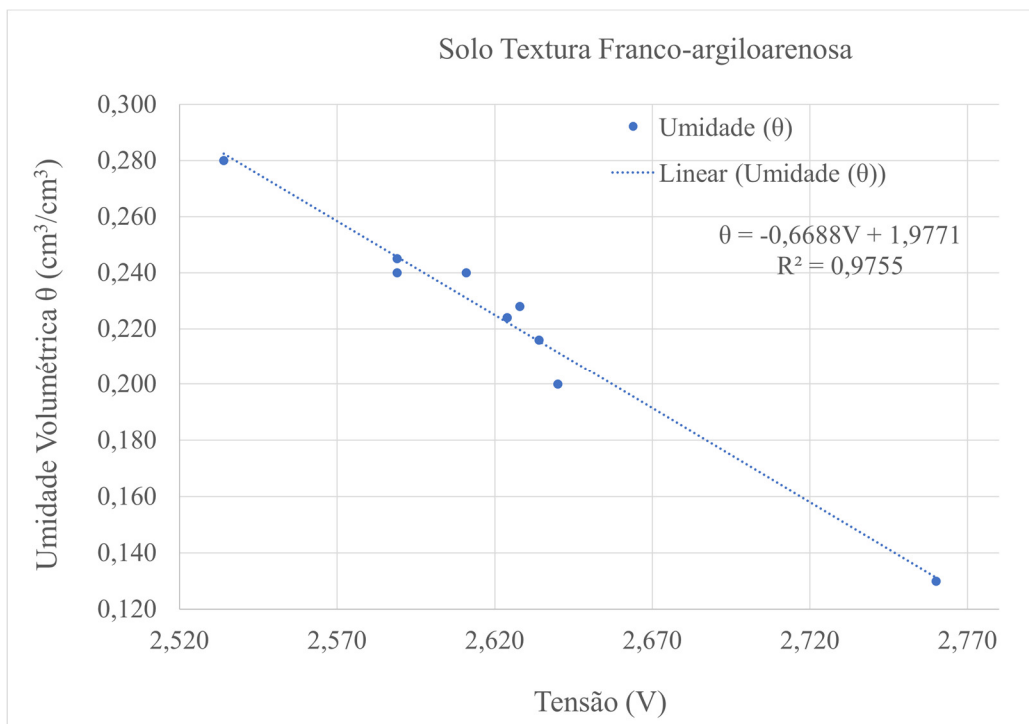


Figura 58. Curva de calibração para solo franco-argiloarenosa para sonda multisegmentada em condição de campo (50 cm). Fonte: Elaborado pelo Autor.

A análise considerando todos os dados da umidade do solo para a obtenção de uma curva de calibração universal pode ser observada na Figura 59. Nesta análise, o coeficiente de determinação foi $R^2 = 0,77$, indicando o valor menos significativo dentre as classes analisadas. Da mesma forma, o erro mais elevado foi registrado, com $RMSE = 0,0447$, evidenciando que a elaboração de uma curva universal está associada a uma estimativa da umidade do solo com maiores margens de erro.

Por outro lado, a redução desse erro ocorre quando a calibração é realizada de forma individualizada, considerando as particularidades de cada solo.

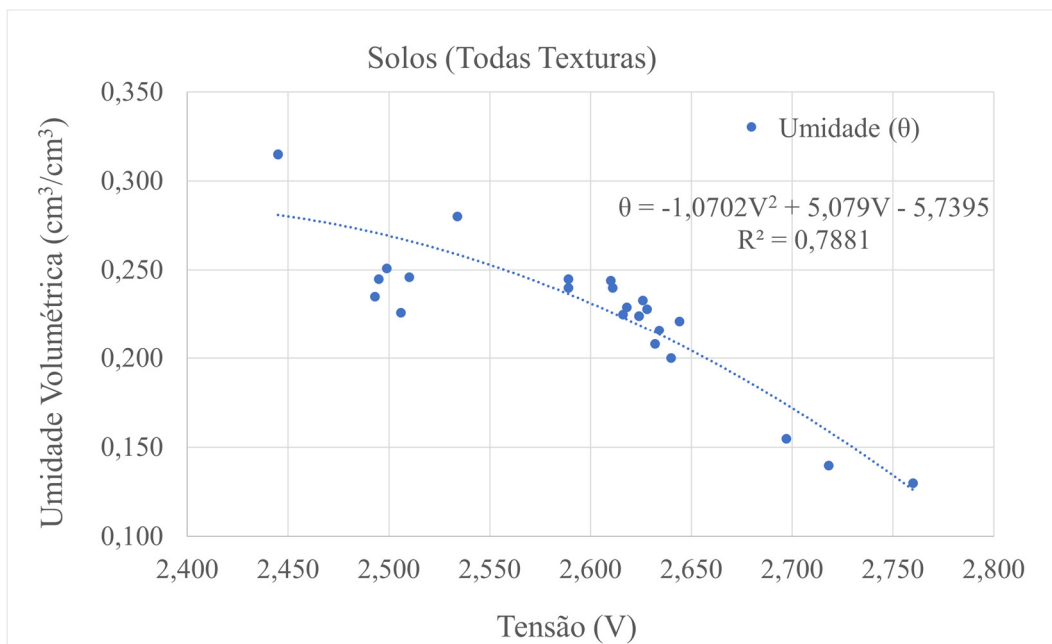


Figura 59. Curva de calibração com todos os dados da calibração em campo. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os trabalhos desenvolvidos por (GAO et al., 2018a) e (SAEED et al., 2019) tiveram seus respectivos sensores calibrados em condição de laboratório, assim como em condição de campo. O sensor desenvolvido por (GAO et al., 2018a), foi calibrado em condição de laboratório utilizando os solos franco-arenoso das províncias de Henan e Jiangxi (China) obtendo como coeficiente de determinação (R^2) e raiz do erro quadrático médio (RMSE) respectivamente 0,9774 e 0,030 para província de Henan, e 0,9884 e 0,0535 na província de Jiangxi. Já na província de Heilongjiang (China) com um solo franco-argiloso obteve o $R^2 = 0,9623$ e $RMSE = 0,0364$. Todas essas calibrações tiveram como modelo de calibração polinômios de primeira ordem.

Diferentemente de (GAO et al., 2018a), o sistema de monitoramento desenvolvido no presente trabalho teve seus dados enviados a longa distância até um centralizador, e na calibração em campo com os solos com texturas Areia franca ($R^2 = 0,9771$ e $RMSE = 0,073$) e Franco-Argiloarenosa ($R^2 = 0,9755$ e $RMSE = 0,0058$), foi possível obter valores de coeficiente de determinação e raiz do erro quadrático médio similares ao obtido por (GAO et al., 2018a).

Assim como realizado no presente trabalho, (SAEED et al., 2019), também realizou a calibração do sensor em condição de laboratório e de campo. No que se refere a calibração em condição de laboratório, foram coletadas amostras em três localidades da China: Beijin (textura Francoarenosa), Yunnan (textura Francoargilosa), e Hebei (textura Franco argiloarenosa). Na condição de campo, o sensor foi instalado na cidade de Jiaxing (30° 45'N, 120° 45'E) em campo

aberto com solo de textura argila, e realizou a calibração em quatro profundidades (10, 20, 40 e 60 cm) realizando a estimativa de umidade durante o dia, de maio a junho de 2018 em intervalos de uma hora, sendo o processo de umedecimento realizado com água de um canal localizado próximo ao sensor.

Ainda segundo (SAEED et al., 2019), amostras do solo foram coletadas nas proximidades do sensor para reduzir os erros em virtude da textura e da densidade do solo. Os resultados apresentados na condição de laboratório para os três solos obtiveram uma equação polinomial de terceira ordem, onde os valores foram: Textura Francoarenosa ($R^2 = 0,99$ e $RSME = 0,97$), Francoargilosa ($R^2 = 0,97$ e $RMSE = 2,01$) e Argiloarenosa ($R^2 = 0,98$ e $RMSE = 1,89$). Já na condição de campo em solo com textura Argila, para cada profundidade os valores foram respectivamente: em 10 cm ($R^2 = 0,98$ e $RMSE = 2,51$), em 20 cm ($R^2 = 0,97$ e $RMSE = 3,39$), 40 cm ($R^2 = 0,98$ e $RMSE = 2,51$) e 60 cm ($R^2 = 0,99$ e $RMSE = 1,31$).

Entretanto, o trabalho efetuado por (SAEED et al., 2019) foi usado para envio de dados sem fio Wi-Fi e o serviço geral de pacotes via rádio (GPRS, do inglês General Packet Radio Service) através de rede de telefonia móvel, ou seja, não utilizou a tecnologia LoRa que foi utilizada no presente trabalho. Dessa forma, resultados da estimativa de umidade do solo nas três camadas onde a sonda multissegmentada foi instalada, apresentaram erro médio absoluto abaixo de 2%, e um coeficiente de determinação (R^2) mínimo de 0,94, com base nesses dados, o sistema proposto nesse trabalho, possui uma acurácia compatível com os sensores de umidade do solo que estão no mercado e sendo desenvolvidos nos centros de pesquisa espalhados pelo mundo.

Contudo, vale destacar que a acurácia de um sistema para estimar a umidade do solo com transmissão a longa distância sem condutor elétrico, torna-se complexo, pois com a transmissão sem condutor, o pacote de dados transmitido entre o transmissor e receptor podem ser perdidos através da atenuação do sinal devido aos obstáculos físicos como árvores, prédios e vegetação local (RAPPAPORT, 2010).

4.10 Telas de Monitoramento (OpenHAB)

Para a interpretação dos dados transmitidos pela sonda multissegmentada, a tela de supervisão do OpenHAB apresenta um gráfico temporal da estimativa da umidade do solo nas três profundidades monitoradas. No gráfico, o eixo vertical representa os valores de umidade volumétrica (cm^3/cm^3), enquanto o eixo horizontal exibe a escala de tempo, que pode ser atualizada em horas, dias ou meses, permitindo o acompanhamento dinâmico da evolução da umidade do solo.



Figura 60. Tela de monitoramento do OpenHAB. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na tela de supervisão (Figura 60), pode-se observar o valor da umidade volumétrica nos três segmentos instalados em campo, onde estão dispostos por cores e profundidade, ou seja, sensor 1 (azul, 10 cm, 21,3 cm³/cm³), sensor 2 (verde, 30 cm, 19,1 cm³/cm³), e por último, sensor 3 (amarelo, 18,6 cm, 20,3 cm³/cm³), além da data e hora no qual o dado foi enviado ao centralizador.

Para analisar o comportamento do sistema em dias de chuva, foi feito um levantamento dos dias em que choveu com base nos dados da estação meteorológica da Ecologia Agrícola (A601).

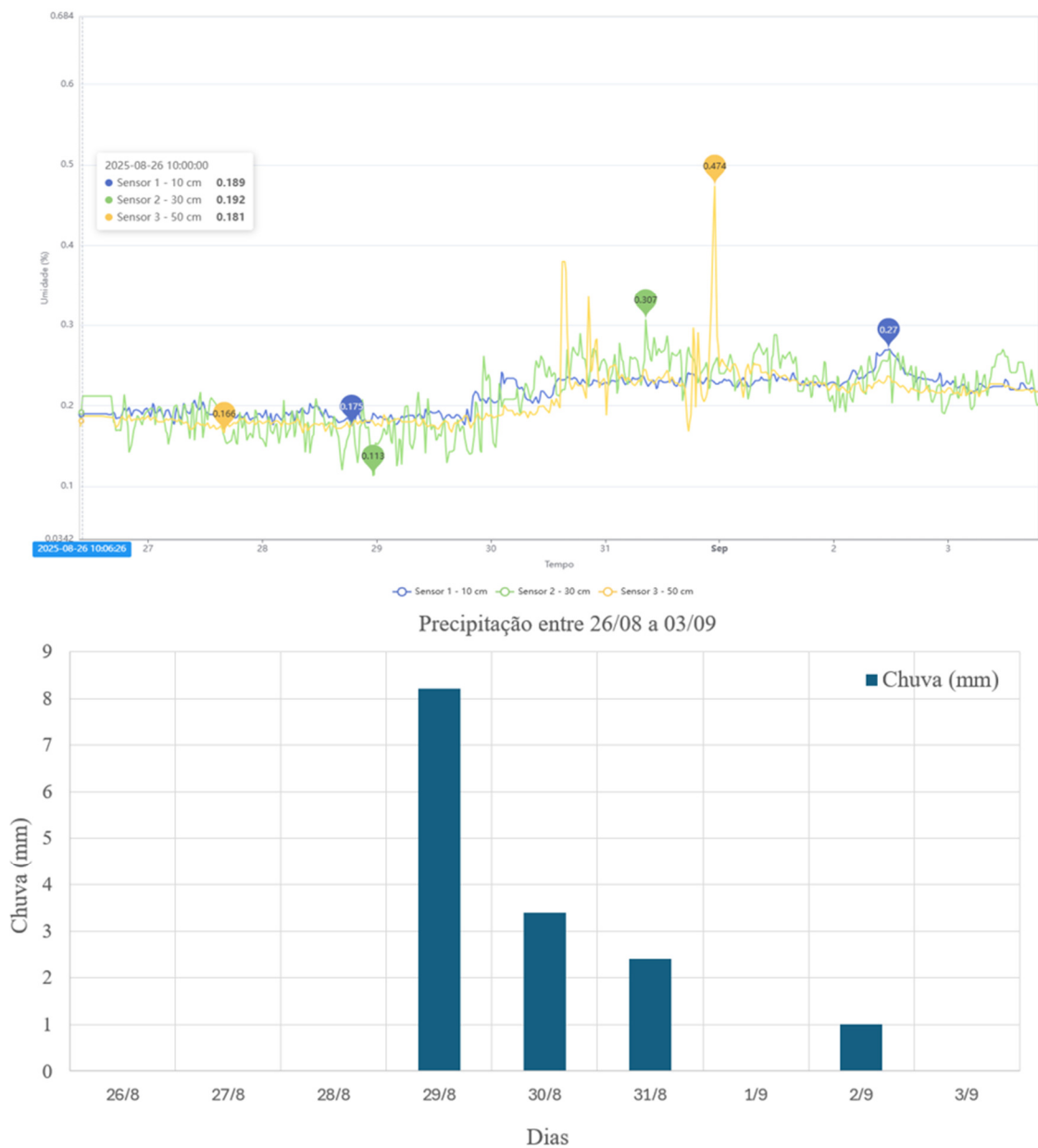


Figura 61. Monitoramento da umidade volumétrica do solo entre 26/08 a 03/09. Fonte: Elaborado pelo Autor.

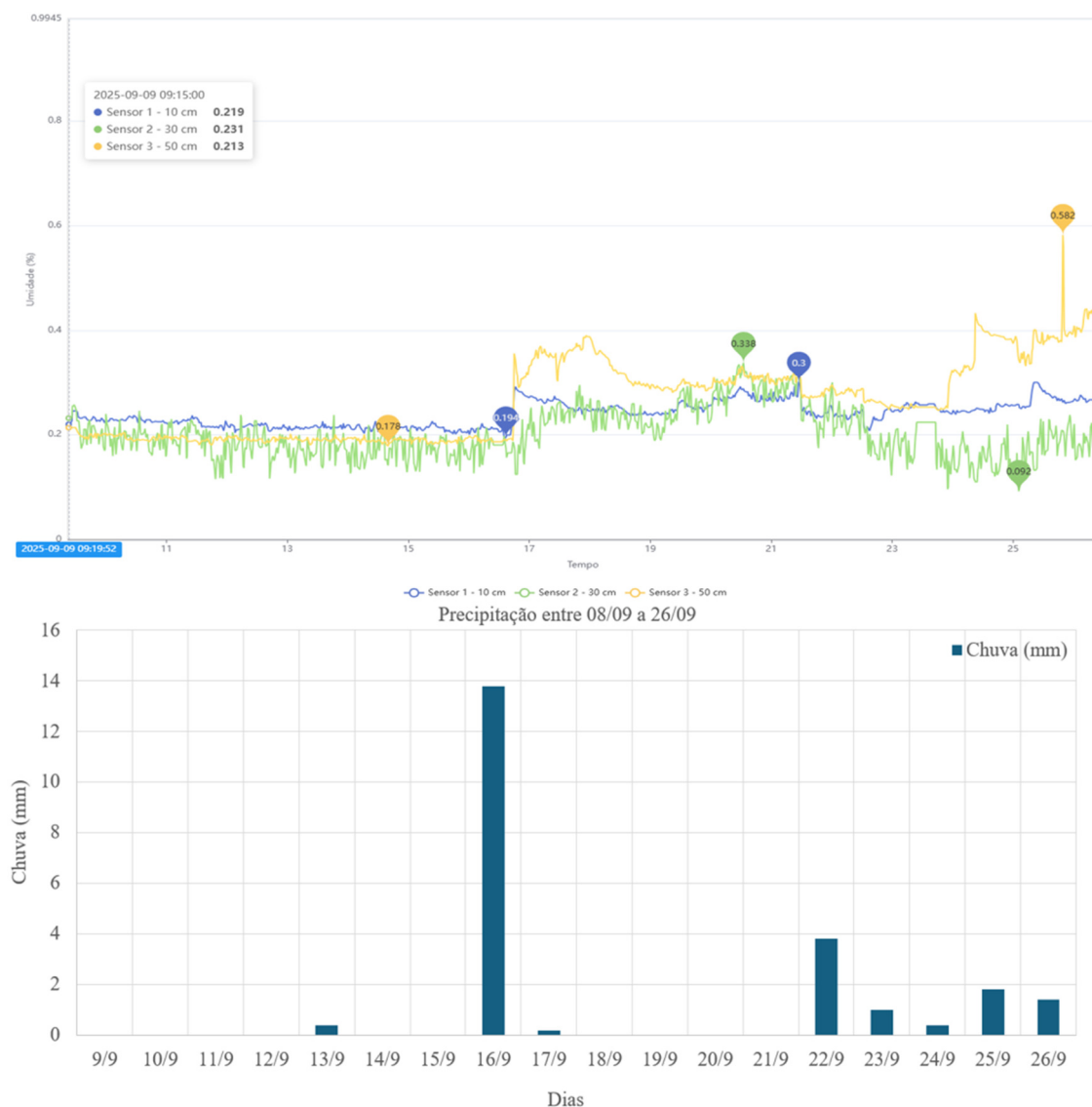


Figura 62. Monitoramento da umidade volumétrica do solo entre 08/09 a 26/09. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nas Figuras 61 e 62, é possível observar a resposta do sensor nos dias em que ocorreram precipitações, especialmente nos dias 29/08 e 16/09, quando houve mudanças significativas nos valores de umidade volumétrica do solo. O sistema detectou uma variação na umidade correspondente a uma precipitação de aproximadamente 8 mm no dia 29/08, bem como outra variação em 02/09, quando choveu 1 mm (Figura 61).

Os picos de umidade volumétrica observados na Figura 61, no dia 31/08 (sensor 3: 0,474 – amarelo; sensor 2: 0,307 – verde), são atribuídos aos furos abertos no solo ao redor do local de instalação da sonda, realizados para coleta de amostras para a umidade gravimétrica.

5. CONCLUSÕES

As simulações realizadas no Software Ansys analisaram o comportamento físico da sonda, considerando o tamanho do segmento (120 mm), os anéis de cobre (30 mm) e a distância entre eles (30 mm). Em seguida, avaliou-se o comportamento do campo elétrico em ambientes com permissividades diferentes, como ar ($\epsilon_{ar} = 1$) e água ($\epsilon_{água} = 81$) alcançando a sensibilidade da sonda e, conseqüentemente, sua acurácia, com erros absolutos em torno de 3%.

A placa eletrônica, desenvolvida com base na frequência de ressonância do circuito tank (LC), apresentou desempenho eficiente nos testes de variação de capacitância, obtendo os valores de tensão elétrica com erro relativo de 5,65% utilizando capacitor auxiliar de 100 pF, possibilitando a construção da placa definitiva em SMD.

Quanto à autonomia energética, a combinação de placa fotovoltaica (10 W) e bateria (12 V, 7 Ah) demonstrou desempenho robusto, com envio de dados a cada 30 minutos durante 24 horas.

A calibração em laboratório, realizada com os segmentos da sonda 1 e 2 em quatro solos de texturas variadas, apresentou R^2 acima de 0,90 para todos os solos, com valor máximo de 0,95 e menor RMSE (0,0187) para o solo de textura argiloarenosa.

A calibração em campo, realizada em três profundidades (10, 30 e 50 cm), revelou que o solo Franco-argiloarenosa (50 cm) obteve os resultados mais acurados ($R^2 = 0,98$; RMSE = 0,0058), enquanto o solo Areia franca (10 cm) apresentou $R^2 = 0,98$; RMSE = 0,0073, e Franco-argiloarenosa (30 cm) $R^2 = 0,94$; RMSE = 0,0139.

O solo de classe de textura areia franca mostrou diferenças entre laboratório e campo, sendo linear em laboratório e polinomial de segunda ordem em campo, destacando a necessidade da calibração in loco. A tentativa de criar uma curva universal de calibração com todos os dados resultou em R^2 e RMSE inferiores aos valores individuais obtidos em laboratório e campo.

A transmissão de dados entre o TTGO da sonda multissegmentada e o TTGO centralizador a 642 m foi bem-sucedida, com armazenamento em nuvem, monitoramento via OpenHAB e servidor local em Raspberry Pi. Dessa forma, o sensor desenvolvido apresenta acurácia e robustez tanto em laboratório quanto em campo, configurando-se como uma plataforma promissora para estimativa de umidade em diversos tipos de solo, diferentes texturas e profundidades, com transmissão de dados a longo alcance.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como sugestão para trabalho futuro, destacam-se:

- a) Utilização de componentes eletrônicos de precisão, como capacitores, resistores e indutores, visando aumentar a acurácia na estimativa da umidade do solo;
- b) Substituição do chip 1648P (VCO), atualmente obsoleto, cujo sinal de oscilação muitas vezes não ultrapassa 100 MHz. A utilização de um chip com maior faixa de oscilação permitirá incrementar a sensibilidade do sensor;
- c) Redução das conversões na placa eletrônica, pois estas geram ruídos que interferem no funcionamento do sistema, prejudicando a qualidade da medição.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASI, A. Z.; ISLAM, N.; SHAIKH, Z. A.; OTHERS. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. **Computer Standards & Interfaces**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 263–270, 2014.
- ABDULRAHEEM, M. I.; CHEN, H.; LI, L.; MOSHOOD, A. Y.; ZHANG, W.; XIONG, Y.; ZHANG, Y.; TAIWO, L. B.; FAROOQUE, A. A.; HU, J. Recent Advances in Dielectric Properties-Based Soil Water Content Measurements. **Remote Sensing**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 1328, 2024.
- ADAMCHUK, V. I.; HUMMEL, J. W.; MORGAN, M. T.; UPADHYAYA, S. K. On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 44, n. 1, p. 71–91, 2004.
- ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentals of electric circuits**. Sixth editioned. New York, NY: McGraw-hill Education, 2017. 2017.
- ALLRED, B. **Handbook of Agricultural Geophysics** (Books in Soils, Plants, and the Environment). [s. l.], 2008.
- AQEEL-UR-REHMAN; A. SHAIKH, Z. Smart Agriculture. In: AHMED ZUBAIRI, J. (org.). **Applications of Modern High Performance Networks**. [S. l.]: Bentham Science Publishers, p. 120–129. 2009. Disponível em: <https://www.eurekaselect.com/node/51619>. Acesso em: 10 nov. 2023.
- AQEEL-UR-REHMAN; ABBASI, A. Z.; ISLAM, N.; SHAIKH, Z. A. A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. **Computer Standards & Interfaces**, [s. l.], v. 36, n. 2, p. 263–270, 2014.
- ARCONI, S. A.; BOITNOTT, G. E. Maxwell–Wagner relaxation in common minerals and a desert soil at low water contents. **Journal of Applied Geophysics**, [s. l.], v. 81, p. 97–105, 2012.
- BASTERRECHEA, D. A.; ROCHER, J.; PARRA, M.; PARRA, L.; MARIN, J. F.; MAURI, P. V.; LLORET, J. Design and Calibration of Moisture Sensor Based on Electromagnetic Field Measurement for Irrigation Monitoring. **Chemosensors**, [s. l.], v. 9, n. 9, p. 251, 2021.
- BINI, D.; PAN, V. Polynomial division and its computational complexity. **Journal of Complexity**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 179–203, 1986.
- BODUROGLU, S.; BASHIR, R. Review of Capillary Rise Experiments for Surface-Active Solutes in the Subsurface. **Geotechnics**, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 706–730, 2022.
- BOGENA, H. R.; HERBST, M.; HUISMAN, J. A.; ROSENBAUM, U.; WEUTHEN, A.; VERECKEN, H. Potential of Wireless Sensor Networks for Measuring Soil Water Content Variability. **Vadose Zone Journal**, [s. l.], v. 9, n. 4, p. 1002–1013, 2010.
- BOYLESTAD, R. L. **Introdução à análise de circuitos**. [s. l.], 2012.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. [S. l.]: Prentice-Hall do Brasil, 1984. 1984.v. 6.

- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. [S. l.]: Bookman Editora, 2009. 2009.
- BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture**. [s. l.], 1907.
- CHANASYK, D. S.; NAETH, M. A. Field measurement of soil moisture using neutron probes. **Canadian Journal of Soil Science**, [s. l.], v. 76, n. 3, p. 317–323, 1996.
- CHARTZOULAKIS, K.; BERTAKI, M. Sustainable Water Management in Agriculture under Climate Change. **Agriculture and Agricultural Science Procedia**, [s. l.], v. 4, p. 88–98, 2015.
- CODELUPPI, G.; CILFONE, A.; DAVOLI, L.; FERRARI, G. LoRaFarM: A LoRaWAN-Based Smart Farming Modular IoT Architecture. **Sensors**, [s. l.], v. 20, n. 7, p. 2028, 2020.
- CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 46, n. 1–3, p. 11–43, 2005.
- CRESSER, M.; KILLHAM, K.; EDWARDS, T. **Soil chemistry and its applications**. [S. l.]: Cambridge University Press, 1993. 1993.v. 5.
- DARCY, H. **Les fontaines publiques de la ville de Dijon**: exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau... un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes au filtrage des eaux. [S. l.]: Victor Dalmont, éditeur, 1856. 1856.v. 1.
- DOBRIYAL, P.; QURESHI, A.; BADOLA, R.; HUSSAIN, S. A. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 458–459, p. 110–117, 2012.
- DOS SANTOS, U. J. L.; PESSIN, G.; DA COSTA, C. A.; DA ROSA RIGHI, R. AgriPrediction: A proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, [s. l.], v. 161, p. 202–213, 2019.
- ELLER, H.; DENOTH, A. A capacitive soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 185, n. 1–4, p. 137–146, 1996.
- FERDOUSH, S.; LI, X. Wireless Sensor Network System Design Using Raspberry Pi and Arduino for Environmental Monitoring Applications. **Procedia Computer Science**, [s. l.], v. 34, p. 103–110, 2014.
- FERNANDES, S. C.; AMARAL, A. M. S. do; ZANETTI, W. A. L.; PUTTI, F. F.; GÓES, B. C. Reuse of water and sludge in agriculture: new technologies for the treatment. **Research, Society and Development**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. e30012128262, 2023.
- FILHO, S. V. **Aterramentos Elétricos**. [s. l.], 2002.
- GAO, Z.; ZHU, Y.; LIU, C.; QIAN, H.; CAO, W.; NI, J. Design and Test of a Soil Profile Moisture Sensor Based on Sensitive Soil Layers. **Sensors**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 1648, 2018a.
- HU, F.; XU, C.; LI, H.; LI, S.; YU, Z.; LI, Y.; HE, X. Particles interaction forces and their effects on soil aggregates breakdown. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 147, p. 1–9, 2015.
- HU, X.; ZHANG, A.; WANG, J. Method for Detecting Water Content of Comb-shaped Capacitor Electrode Coating. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ARTIFICIAL

INTELLIGENCE AND ELECTROMECHANICAL AUTOMATION (AIEA), 2021, Guangzhou, China. **Anais** [...]. Guangzhou, China: IEEE, p. 179–185. 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9525500/>. Acesso em: 9 jan. 2022.

INOUE, M.; AHMED, O.; IRSHAD, M. Comparison of Twelve Dielectric Moisture Probes for Soil Water Measurement under Saline Conditions. **American Journal of Environmental Sciences**, [s. l.], v. 4, 2008.

KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G. Dielectric constant obtained from TDR and volumetric moisture of soils in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 649–658, 2010.

KODIKARA, J.; RAJEEV, P.; CHAN, D.; GALLAGE, C. Soil moisture monitoring at the field scale using neutron probe. **Canadian Geotechnical Journal**, [s. l.], v. 51, n. 3, p. 332–345, 2014.

LEHNINGER, A. L.; NELSON, D. L.; COX, M. M. **Lehninger principles of biochemistry**. 6th eded. New York: W.H. Freeman, 2013. 2013.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo** Vol. 61. [S. l.]: EdUSP, 2005. 2005.

LLORET, J.; SENDRA, S.; GARCIA, L.; JIMENEZ, J. M. A Wireless Sensor Network Deployment for Soil Moisture Monitoring in Precision Agriculture. **Sensors**, [s. l.], v. 21, n. 21, p. 7243, 2021.

LUNT, I. A.; HUBBARD, S. S.; RUBIN, Y. Soil moisture content estimation using ground-penetrating radar reflection data. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 307, n. 1–4, p. 254–269, 2005.

MALGARINOS, I.; NIKOLOPOULOS, N.; MARENGO, M.; ANTONINI, C.; GAVAISES, M. VOF simulations of the contact angle dynamics during the drop spreading: Standard models and a new wetting force model. **Advances in Colloid and Interface Science**, [s. l.], v. 212, p. 1–20, 2014.

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Evangraf, [s. l.], v. 5, 2006.

MOGHADDAM, M.; ENTEKHABI, D.; GOYKHMEN, Y.; LI, K.; LIU, M.; MAHAJAN, A.; NAYYAR, A.; SHUMAN, D.; TENEKETZIS, D. A Wireless Soil Moisture Smart Sensor Web Using Physics-Based Optimal Control: Concept and Initial Demonstrations. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 522–535, 2010.

MORAIS, R.; VALENTE, A.; SERÔDIO, C. A **Wireless Sensor Network for Smart Irrigation and Environmental Monitoring**: A Position Article. [s. l.], p. 6, 2005.

MORETTIN, P. A.; SINGER, J. M. **Estatística e ciência de dados**. [s. l.], 2025.

NISSEN, H. H.; FERRÉ, P. A.; MOLDRUP, P. TIME DOMAIN REFLECTOMETRY DEVELOPMENTS IN SOIL SCIENCE: I. UNBALANCED TWO-ROD PROBE SPATIAL SENSITIVITY AND SAMPLING VOLUME. **Soil Science**, [s. l.], v. 168, n. 2, p. 77–83, 2003.

OSMAN, K. T. **Soils: Principles, Properties and Management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. 2013. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/978-94-007-5663-2>. Acesso em: 28 fev. 2023.

- PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F. D. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s. l.], v. 16, n. 6, p. 3786–3802, 2012.
- PETRE, A.-R.; CRACIUNESCU, R.; FRATU, O. Design, Implementation and Simulation of a Fringing Field Capacitive Humidity Sensor. **Sensors**, [s. l.], v. 20, n. 19, p. 5644, 2020.
- RAPPAPORT, T. S. **Wireless communications: Principles and practice**, 2/E. [S. l.]: Pearson Education India, 2010. 2010.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. [s. l.], n. 2º, 2012.
- ROBINSON, D. A.; CAMPBELL, C. S.; HOPMANS, J. W.; HORNBUCKLE, B. K.; JONES, S. B.; KNIGHT, R.; OGDEN, F.; SELKER, J.; WENDROTH, O. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. **Vadose Zone Journal**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 358–389, 2008.
- ROBINSON, D. A.; JONES, S. B.; WRAITH, J. M.; OR, D.; FRIEDMAN, S. P. A Review of Advances in Dielectric and Electrical Conductivity Measurement in Soils Using Time Domain Reflectometry. **Vadose Zone J.**, [s. l.], v. 2, p. 32, 2003.
- ROWLANDSON, T. L.; BERG, A. A.; BULLOCK, P. R.; OJO, E. R.; MCNAIRN, H.; WISEMAN, G.; COSH, M. H. Evaluation of several calibration procedures for a portable soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 498, p. 335–344, 2013.
- SAEED, I. A.; QINGLAN, S.; WANG, M.; BUTT, S. L.; ZHENG, L.; TUAN, V. N.; WANLIN, G. **Development of a Low-Cost Multi-Depth Real-Time Soil Moisture Sensor Using Time Division Multiplexing Approach**. *IEEE Access*, [s. l.], v. 7, p. 19688–19697, 2019.
- SAHITYA, G.; BALAJI, N.; NAIDU, C. D. Wireless sensor network for smart agriculture. In: 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED AND THEORETICAL COMPUTING AND COMMUNICATION TECHNOLOGY (ICATCCT), II, 2016, Bangalore, India. **Anais [...]**. Bangalore, India: IEEE, p. 488–493. 2016. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7912049/>. Acesso em: 9 fev. 2023.
- SALEH, M.; ELHAJJ, I. H.; ASMAR, D.; BASHOUR, I.; KIDESS, S. Experimental evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors. In: IEEE INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON ENGINEERING TECHNOLOGY (IMCET), 2016, [s. l.], **Anais [...]**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 179–184.
- SANTOS, M. R.; ZONTA, J. H.; MARTINEZ, M. A. Influência do tipo de amostragem na constante dielétrica do solo e na calibração de sondas de TDR. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 34, n. 2, p. 299–308, 2010.
- SHI, W.; ZHANG, S.; WANG, M.; ZHENG, W. Design and performance analysis of soil temperature and humidity sensor. **IFAC-PapersOnLine**, [s. l.], v. 51, n. 17, p. 586–590, 2018a.
- SHUKLA, M. K. S. **Soil Physics: An Introduction**. 1 st Editioned. Boca Raton: CRC Press, 2013. 2013.
- SPARKS, D. L.; SINGH, B.; SIEBECKER, M. G. **Environmental soil chemistry**. [S. l.]: Elsevier, 2022. 2022.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. 2nd eded. Oxford; New York: Oxford University Press, 2008. 2008.

S.U., S. L.; SINGH, D. N.; SHOJAEI BAGHINI, M. A critical review of soil moisture measurement. **Measurement**, [s. l.], v. 54, p. 92–105, 2014a.

SUITS, L. D.; SHEAHAN, T. C.; MOHAMED, A.-M. O.; MARWAN, S. S. Impact of Soil Magnetic Properties on Moisture Content Prediction Using TDR. **Geotechnical Testing Journal**, [s. l.], v. 34, n. 3, p. 102792, 2011.

SZYPLÓWSKA, A.; LEWANDOWSKI, A.; JONES, S. B.; SABOUROUX, P.; SZEREMENT, J.; KAFARSKI, M.; WILCZEK, A.; SKIERUCHA, W. Impact of soil salinity, texture and measurement frequency on the relations between soil moisture and 20 MHz–3 GHz dielectric permittivity spectrum for soils of medium texture. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 579, p. 124155, 2019.

TAN, K. H. **Principles of soil chemistry**. [S. l.]: CRC press, 2010.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos e análises de solo**. 3ºed. Brasília: Embrapa, 2017. 2017. Disponível em: http://www.cse.edu.uy/sites/www.cse.edu.uy/files/documentos/Liccom_Camejo_2011-07-28.pdf.

TOPP, G. c.; ZEGELIN, S.; WHITE, I. Impacts of the Real and Imaginary Components of Relative Permittivity on Time Domain Reflectometry Measurements in Soils. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 64, n. 4, p. 1244–1252, 2000.

TSE, D.; VISWANATH, P. **Fundamentals of Wireless Communication**. 1. ed. [S. l.]: Cambridge University Press, 2005. 2005. Disponível em: <https://www.cambridge.org/core/product/identifier/9780511807213/type/book>. Acesso em: 10 jul. 2025.

TULLER, M.; OR, D.; HILLEL, D. Retention of water in soil and the soil water characteristic curve. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, [s. l.], v. 4, p. 278–289, 2004.

VILES, E. C.; SILVESTRE, E. R. R.; MAYDANA, E. B. C.; LOPEZ, W. O.; OLIVERA, C. C. Performance assessment of a Low-Power Wide-Area wireless network based on LoRa technology using IoT devices in different Bolivia areas. In: IEEE EIGHTH ECUADOR TECHNICAL CHAPTERS MEETING (ETCM), 2024, Cuenca, Ecuador. **Anais [...]**. Cuenca, Ecuador: IEEE, 2024. p. 1–4. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10746217/>. Acesso em: 9 out. 2025.

WALKER, H., D. **Fundamentos de física**. 9.ed.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. 2012.v. V.2.

WALKER, J.; RESNICK, R.; HALLIDAY, D. **Halliday & Resnick fundamentals of physics**. 10th editioned. Hoboken, NJ: Wiley, 2014. 2014.

WANG, Z.; WANG, J.; LI, W.; LI, Z. **Study on Capacitance Sensor Simulation of Ice Thickness Measurement Based on ANSYS**. [s. l.], v. 162, n. 1, p. 6, 2014.

YOUNG, M. H.; FLEMING, J. B.; WIERENGA, P. J.; WARRICK, A. W. Rapid Laboratory Calibration of Time Domain Reflectometry Using Upward Infiltration. **Soil Science Society of America Journal**, [s. l.], v. 61, n. 3, p. 707–712, 1997.

YU, L.; GAO, W.; R. SHAMSHIRI, R.; TAO, S.; REN, Y.; ZHANG, Y.; SU, G.; 1. COLLEGE OF INFORMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING, CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY, BEIJING 100083, CHINA; 2. COLLEGE OF INFORMATION SCIENCE AND ENGINEERING, SHANDONG AGRICULTURE AND ENGINEERING UNIVERSITY, SHANDONG 250100, CHINA; 3. LEIBNIZ INSTITUTE FOR AGRICULTURAL ENGINEERING AND BIOECONOMY, POTSDAM-BORNIM 14469, GERMANY. Review of research progress on soil moisture sensor technology. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 32–42, 2021.

YU, Z.; LI, H.; LIU, X.; XU, C.; XIONG, H. Influence of soil electric field on water movement in soil. **Soil and Tillage Research**, [s. l.], v. 155, p. 263–270, 2016.

ZAWILSKI, B. M.; GRANOULLAC, F.; CLAVERIE, N.; LEMAIRE, B.; BRUT, A.; TALLEC, T. Calculation of soil water content using dielectric-permittivity-based sensors – benefits of soil-specific calibration. **Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems**, [s. l.], v. 12, n. 1, p. 45–56, 2023.

ZAZUETA, F. S.; XIN, J. **Soil Moisture Sensors**. [s. l.], 1994.

8. APÊNDICE

8.1 Resultado das simulações com os capacitores auxiliares 10 e 56 pF.

Tabela 23. Valores da simulação da placa eletrônica com $C_{auxiliar}$ 10 pF.

C_{sonda} (pF)	VCO (MHz)		Prescaler (kHz)		Contador Binário (Hz)		Conversor (mV)		Erro Relativo Conversor
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	(%)
2,5	14,03	10,10	223,49	156,81	873,01	615,80	571	404	29,25
5,0	13,19	9,14	206,20	142,11	805,44	556,08	527	367	30,36
7,5	12,38	8,84	193,47	137,55	755,74	538,44	495	355	28,28
10	11,75	8,66	183,66	134,23	717,42	521,21	470	346	26,38
12,5	11,25	8,44	175,84	130,96	686,88	511,88	450	338	24,89
15	10,84	8,33	169,45	129,60	661,90	502,97	433	333	23,09
17,5	10,50	8,13	164,11	125,82	641,04	493,17	419	326	22,20
20	10,21	8,03	159,57	124,67	623,33	488,11	408	322	21,08
22,5	9,96	7,91	155,68	122,56	608,11	480,13	398	318	20,10
25	9,74	7,78	152,28	120,85	594,86	472,55	389	312	19,79
27,5	9,55	7,69	149,30	119,19	538,21	466,27	382	308	19,37
30	9,38	7,49	146,66	116,14	572,90	461,83	375	305	18,67
32,5	9,23	7,43	144,31	115,18	563,69	451,12	369	200	18,70
35	9,10	7,38	142,19	114,21	555,42	447,41	363	296	18,46
47	8,60	7,22	134,42	111,58	525,06	436,66	344	295	14,24
56	8,34	7,02	130,32	108,67	509,04	425,66	333	289	13,21
68	8,07	6,85	126,23	105,55	493,06	413,24	323	277	14,24
78	7,91	6,73	123,62	104,06	482,88	407,68	316	271	14,24
100	7,64	6,60	119,46	101,98	466,64	399,11	305	266	12,79

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com base nos dados apresentados na Tabela 23, há uma redução do erro relativo (%) da tensão com aumento dos valores de C_{sonda} . Essa redução se mostra linear, contudo, no que diz respeito aos valores de C_{sonda} : 47, 68 e 78 pF o erro relativo permaneceu constante em 14,24 % e reduzindo a 12,79 % quando C_{sonda} em 100 pF.

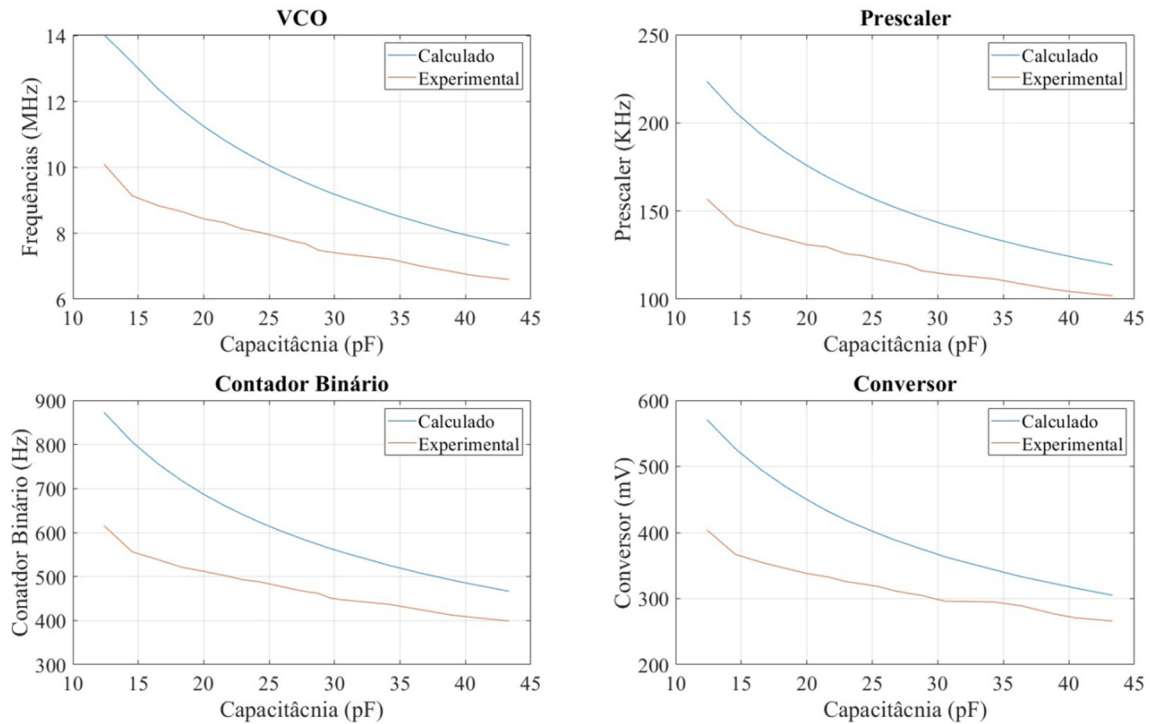


Figura 61. Valores calculados e experimentais dos componentes do protótipo da placa eletrônica, utilizando $C_{auxiliar}$ de 10 pF. Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na Figura 58, o erro relativo médio para o VCO, *Prescaler*, Contador e o Conversor foram respectivamente: 21,46; 20,81; 20, 56 e 19,79 %. Nota-se uma diminuição considerável do erro quando C_{Total} se aproxima de 35 pF, contudo, são considerados altos mesmo levando em consideração as incertezas dos componentes que compõe a placa.

Tabela 164. Valores da simulação da placa eletrônica com $C_{auxiliar}$ 56 pF.

C_{sonda} (pF)	VCO (MHz)		Prescaler (kHz)		Contador Binário (Hz)		Conversor (mV)		Erro Relativo Conversor (%)
	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	Cal.	Exp.	
2,5	6,85	5,85	102,92	89,56	402,03	351,44	263	255	3,04
5,0	6,46	5,76	101,06	88,82	394,78	346,98	258	240	6,98
7,5	6,36	5,68	99,45	87,66	388,49	342,23	254	235	7,48
10	6,27	5,63	98,04	86,84	382,98	339,21	250	227	9,20
12,5	6,19	5,57	96,79	85,90	378,11	335,53	247	225	8,91
15	6,12	5,52	95,69	85,16	373,78	332,67	244	222	9,02
17,5	6,06	5,48	94,69	84,42	369,90	329,21	242	221	8,96
20	6,00	5,46	93,80	84,26	366,40	327,19	240	220	8,33
22,5	5,95	5,42	92,99	83,88	363,24	326,46	248	218	8,40
25	5,90	9,38	92,25	82,68	360,35	322,16	236	217	8,05
27,5	5,86	5,35	91,54	82,48	357,71	321,19	234	215	8,12
30	5,82	5,28	90,95	81,27	355,29	317,48	232	212	8,62
32,5	5,78	5,25	90,38	80,82	353,07	315,66	231	210	9,09
35	5,75	5,22	89,85	80,50	351,00	314,45	229	209	8,73
47	5,61	5,15	87,79	79,54	342,95	310,69	224	209	6,70
56	5,54	5,09	86,62	78,49	338,37	306,62	221	206	6,79
68	5,46	5,01	85,39	77,30	333,55	301,90	218	201	7,80
78	5,41	4,99	84,56	77,00	330,34	300,01	216	200	7,41
100	5,32	4,93	83,20	75,97	325,00	296,75	213	199	6,57

Fonte: Elaborado pelo Autor.

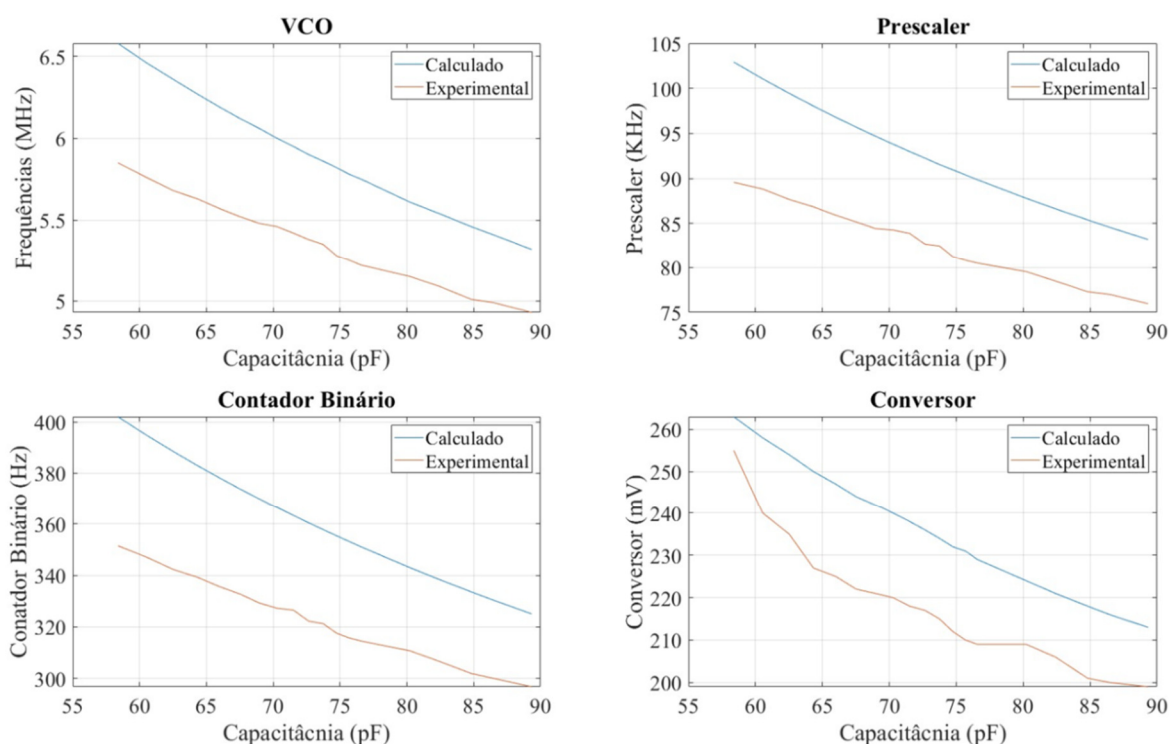


Figura 62. Valores calculados e experimentais dos componentes do protótipo da placa eletrônica, utilizando $C_{auxiliar}$ de 56 pF. Fonte: Elaborado pelo Autor.

O aumento da $C_{auxiliar}$ de 10 para 56 pF provocou uma redução do erro relativo, entretanto, nota-se na Figura 59 que o gráfico do Conversor apresentou um comportamento constante entre 75 e 80 pF, em seguida uma redução brusca em 85 pF.