

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

EDUARDO OLIVEIRA RODRIGUES

**TRANSDUTOR DE UMIDADE DO SOLO USANDO A TÉCNICA CAPACITIVA
EM ALTAS FREQUÊNCIAS**

Itajaí - SC

Agosto, 2023

EDUARDO OLIVEIRA RODRIGUES

TRANSDUTOR DE UMIDADE DO SOLO USANDO A TÉCNICA CAPACITIVA EM ALTAS FREQUÊNCIAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Curso de Engenharia de Elétrica do Campus Itajaí do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Engenheiro de Eletricista.

Orientador: Roddy Alexander Romero Antayhua

Itajaí - SC

Agosto, 2023

Ficha de Identificação da Obra
Sistema de Bibliotecas Integradas do IFSC - Campus Itajaí

Rodrigues, Eduardo Oliveira

Transdutor de umidade do solo usando a técnica capacitiva em altas frequências / Eduardo Oliveira Rodrigues ; orientador, Roddy Alexander Romero Antayhua, 2023.

68 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Itajaí, Graduação em Engenharia Elétrica, Itajaí, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Solos - Umidade. 3. Técnicas de medição. 4. Transdutores e sensores. I. Antayhua, Roddy Alexander Romero. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

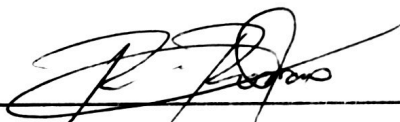
TRANSDUTOR DE UMIDADE DO SOLO USANDO A TÉCNICA CAPACITIVA EM ALTAS FREQUÊNCIAS

EDUARDO OLIVEIRA RODRIGUES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Eletricista e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Itajaí, 24 de agosto de 2023.

Banca Examinadora:



Prof. Roddy Alexander Romero Antayhua, Dr. Eng., IFSC (Orientador)



Prof. Guilherme Ranzolin Piazzetta, Me. Eng., IFSC



Prof. Carlyle Câmara Santos Júnior, Me. Eng., IFSC

RESUMO

Agricultura desempenha um papel de grande relevância na economia brasileira, com o agro-negócio impulsionando exportações lucrativas. No entanto, muitos agricultores enfrentam desafios significativos, incluindo a gestão de recursos hídricos e a falta de acesso a tecnologias de medição do conteúdo volumétrico de água no solo. Nesse contexto, os sensores capacitivos emergem como soluções de baixo custo para auxiliar na tomada de decisões relacionadas à irrigação e ao manejo eficiente da água. Diversos sensores capacitivos têm sido desenvolvidos, permitindo medições confiáveis do conteúdo volumétrico de água. Esses sensores envolvem circuitos eletrônicos e sondas que detectam as flutuações na capacitância do solo, usando como base a constante dielétrica característica do meio inserido. Com base nessas medições, os agricultores podem obter informações cruciais sobre a disponibilidade de água no solo, facilitando decisões na irrigação e cultivo. Este trabalho se concentra no desenvolvimento de um transdutor capacitivo para operação em alta frequência destinado a detectar e quantificar o conteúdo volumétrico de água no solo, com um foco especial na gestão de culturas de hortaliças. O transdutor foi comparado e uma curva de calibração foi estabelecida a partir das medições. O efeito da temperatura e da condutividade elétrica foi estudado obtendo baixa correlação com o dispositivo desenvolvido. Além disso, o protótipo capacitivo apresenta potencial para medir o conteúdo volumétrico de água no solo e proporcionar informações valiosas para otimizar o manejo de cultivos. Esse avanço pode contribuir para uma prática agrícola mais eficiente e ecologicamente sustentável.

Palavras-chave: Transdutor. Conteúdo volumétrico do solo. Calibração.

ABSTRACT

Agriculture plays a significant role in the Brazilian economy, with agribusiness driving lucrative exports. However, many farmers face significant challenges, including water resource management and the lack of access to technologies for measuring soil volumetric water content. In this context, capacitive sensors emerge as cost-effective solutions to assist in decision-making related to irrigation and efficient water management. Various capacitive sensors have been developed, enabling reliable measurements of volumetric water content. These sensors involve electronic circuits and probes that detect fluctuations in soil capacitance, based on the characteristic dielectric constant of the inserted medium. Based on these measurements, farmers can obtain crucial information about soil water availability, facilitating decisions in irrigation and cultivation. This work focuses on the development of a capacitive transducer for high-frequency operation aimed at detecting and quantifying volumetric water content in the soil, with a special focus on vegetable crop management. The transducer was compared, and a calibration curve was established from the measurements. The effects of temperature and electrical conductivity were studied, showing a low correlation with the developed device. Furthermore, the capacitive prototype has the potential to measure soil volumetric water content and provide valuable information for optimizing crop management. This advancement could contribute to more efficient and environmentally sustainable agricultural practices

Keywords: Transducer. Volumetric soil content. Calibration.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diferença entre solo poroso e um menos poroso.	20
Figura 2 – Métodos relacionados a condição da água no solo.	22
Figura 3 – Circuito LC com frequência de oscilação definida pela equação (2.6).	27
Figura 4 – Sensor Capacitivo Teros 12.	30
Figura 5 – Sensor de Umidade Capacitivo com Proteção Contra Oxidação.	30
Figura 6 – Sonda coplanar implementada para o presente trabalho.	31
Figura 7 – Diagrama de blocos do sensor proposto.	31
Figura 8 – Diagrama de blocos do circuito de controle.	33
Figura 9 – Diagrama de blocos do transdutor detalhado.	34
Figura 10 – Circuito esquemático de exemplo de um Oscilador Controlado por Tensão.	35
Figura 11 – Visão de ambos os lados das sondas capacitivas e o transdutor.	37
Figura 12 – Visão de ambos os lados da placa de controle em formato 3D.	38
Figura 13 – Terra utilizada para calibração e medições.	40
Figura 14 – Disposição dos sensores antes da calibração.	41
Figura 15 – Sensores dentro do recipiente já com a terra úmida.	42
Figura 16 – Sensores dentro do recipiente de medição.	43
Figura 17 – Aparato de medição com o canal 1 do osciloscópio conectado ao sinal de saída do sensor projetado.	45
Figura 18 – Curva com valores medidos e curva de calibração do sensor 1.	46
Figura 19 – Curva com valores medidos e curva de calibração do sensor 2.	47
Figura 20 – Curva com valores medidos e curva de calibração do sensor 3.	47
Figura 21 – Gráfico de dispersão de frequência em relação à temperatura do sensor S1.	49
Figura 22 – Gráfico de dispersão de contagens em relação à temperatura do sensor S2.	49
Figura 23 – Gráfico de dispersão de tensão em relação à temperatura do sensor S3.	50
Figura 24 – Curvas a partir dos dados coletados durante os dias 28 e 31 de maio de 2023.	51
Figura 25 – Curvas dos dados brutos dos três sensores durante os primeiros 580 minutos, ou primeiro período, de experimento.	52
Figura 26 – Curvas dos dados a partir das curvas de calibração respectiva de cada um dos três sensores durante os primeiros 580 minutos, ou primeiro período, de experimento.	52
Figura 27 – Curva de condutividade elétrica do solo medida pelo sensor Teros 12 durante o experimento.	54
Figura 28 – Gráfico de dispersão da frequência em relação à condutividade elétrica do sensor S1.	54
Figura 29 – Curvas dos dados brutos dos dois sensores durante o segundo período de experimento.	55

Figura 30 – Curvas dos dados após o processo de calibração respectiva de cada um dos dois sensores durante o segundo período de experimento.	55
Figura 31 – Curvas dos dados brutos dos dois sensores durante o terceiro período de experimento.	56
Figura 32 – Curvas dos dados após o processo de calibração respectiva de cada um dos dois sensores durante o terceiro período de experimento.	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Tabela comparativa entre as tecnologia de sensores capacitivos utilizadas em trabalhos da área.	32
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constante dielétrica dos materiais que formam a maioria dos solos.	25
Tabela 2 – Medidas de VWC e resposta em frequência do protótipo (S1).	45
Tabela 3 – Medidas de quantidade volumétrica de água do solo em contagens do sensor comercial TERO12 (S2)	46
Tabela 4 – Medidas de quantidade volumétrica de água do solo em tensão do sensor Soil Moisture Sensor v1.2 (S3).	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Contextualização	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Problemática	14
1.4	Objetivos	14
1.4.1	Objetivo geral	14
1.4.2	Objetivo específico	15
1.5	Estado da arte	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Característica e hidrologia do solo	18
2.1.1	Volume	18
2.1.2	Definição do conteúdo volumétrico de água	19
2.1.2.1	Massa relativa de água	19
2.1.2.2	Volume relativo de água	19
2.1.3	Porosidade	20
2.1.4	Condutividade elétrica	21
2.2	Técnicas de medição	21
2.2.1	Técnicas de medição	22
2.2.1.1	Método gravimétrico	22
2.2.1.2	Método nuclear	23
2.2.1.3	Método eletromagnético	23
2.2.1.3.1	Método da resistividade elétrica	23
2.2.1.3.2	Reflectometria no domínio do tempo (TDR)	24
2.2.1.3.3	Reflectometria no domínio da frequência (FDR)	24
2.2.1.3.4	Método capacitivo ou dielétrico	25
2.3	Osciladores LC	26
2.4	Interface de dados em série a 1200 baud (SDI-12)	27
2.5	Datalogger	27
3	DESENVOLVIMENTO	29
3.1	Materiais e métodos	29
3.1.1	Seleção da sonda capacitiva	29
3.1.2	Diagrama de blocos do sensor	31
3.2	Circuito de Aquisição	32
3.2.0.1	Circuito de Controle	32

3.2.0.2	Circuito Transdutor	33
3.2.0.2.1	Oscilador LC Controlado por Tensão (VCO)	33
3.2.0.2.2	Divisor de frequência	35
3.2.0.2.3	Amplificador	36
3.2.0.2.4	Circuito final	36
3.3	Calibração dos sensores	36
3.3.0.1	Medidas de frequência com Arduino	37
3.3.0.2	Medidas dos três sensores	38
3.3.0.3	Calibração dos sensores	39
3.3.1	Experimento prático	41
4	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	44
4.1	Circuito transdutor	44
4.2	Calibração dos sensores	45
4.2.1	Efeito da temperatura nos sensores	48
4.3	Resposta dos sensores à variação de água no solo	49
5	CONCLUSÃO	58
	REFERÊNCIAS	60
	APÊNDICES	64
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO FINAL DO CIRCUITO DE CONTROLE	65
	APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO FINAL DO CIRCUITO TRANSDUTOR	66
	APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO CIRCUITO TRANSDUTOR PARA IMPRES- SÃO EM PLACA COBREADA	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

De acordo com [Clemente \(2015\)](#), o cultivo de hortaliças no Brasil assume um destaque significativo no âmbito do agronegócio, sendo que a grande maioria das propriedades pertence a unidades familiares. Esse segmento está presente em todas as regiões, principalmente no Sul e Sudeste do país, proporcionando emprego e renda aos agricultores. Estimativas recentes indicam que a safra brasileira de hortaliças ultrapassa 19 milhões de toneladas, abrangendo 32 espécies cultivadas, e movimenta mais de 24 milhões. As culturas que respondem pelo maior volume de produção são o tomate, a batata, a cebola, a cenoura, a batata-doce e o alho. Além disso, o uso de espaços ociosos é uma alternativa que gera renda extra, melhorando a qualidade de vida dos produtores familiares ([ALVES, 2006](#))

Muitas vezes, esses produtores não têm condições para grandes investimentos ou enfrentam a falta de programas voltados para o incentivo à tecnologia no campo, embora esse cenário esteja mudando ao longo dos anos. Além disso, para um bom desenvolvimento do plantio, é necessário um manejo adequado, o qual inclui a irrigação e o uso eficiente da água. Para que o produtor possa tomar decisões assertivas, além de entender o seu cultivo, ele precisa ser capaz de escolher quando irrigar e, mais especificamente, a quantidade de água realmente disponível no solo. Em outras palavras, a sustentabilidade e a eficiência do setor agrícola estão diretamente relacionadas à gestão dos recursos naturais, especialmente a água, um recurso fundamental para o crescimento das plantas. Essa característica, combinada com o alto custo dos dispositivos comerciais de detecção do conteúdo volumétrico da água no solo, que precisam ser importados, inviabiliza possíveis investimentos por parte dos agricultores.

[Levidow et al. \(2014\)](#) comentam que, apesar de existirem documentos que orientam o uso adequado desses recursos, a maioria dos agricultores não os utiliza. Eles recorrem a técnicas pouco assertivas e, por vezes, empíricas para estimar a quantidade de água disponível para as plantas, o que diminui a eficiência. Com a tecnologia disponível, ela pode ser aplicada ao seguimento da agricultura familiar com uso de sensores de umidade, sensores de chuva, sensores de quantidade de água no solo, etc. Esses sensores fornecem informações relacionadas ao solo, revelando suas características e permitindo que o agricultor tome decisões mais assertivas quanto ao uso dos recursos. Dessa forma, o produtor pode investir em novas tecnologias para aumentar a qualidade dos produtos oferecidos. Outra vantagem do uso desses dispositivos na agricultura é a redução do requisito de mão de obra, que é escassa devido ao fato de apenas membros familiares estarem envolvidos no processo de plantio. Em alguns casos, pode ser necessário contratar mão de obra qualificada para utilizar essas tecnologias. Levando em consideração a sustentabilidade e a tecnologia de sensoriamento, é possível medir a situação da água

no solo como informação crucial para o bom gerenciamento dos recursos hídricos e o manejo adequado do plantio.

1.2 Justificativa

A grande motivação por trás deste trabalho é desenvolver um dispositivo que possa desempenhar um papel ativo no controle da irrigação de culturas, especialmente no contexto das hortaliças, que foi o foco deste estudo.

Com a utilização efetiva desse dispositivo, os agricultores poderão ter um maior controle sobre os recursos hídricos relacionados à produção. Isso implica redução do consumo de água, minimização dos efeitos de erosão e salinização do solo, além de maximização dos recursos hídricos disponíveis. Essas medidas contribuirão para a eficiência da agricultura, tornando o setor mais competitivo com o uso de dispositivos confiáveis.

Além disso, ao permitir um controle mais preciso da irrigação, o dispositivo também possibilitará economias significativas no âmbito da agricultura, beneficiando os agricultores em termos financeiros. Dessa forma, o desenvolvimento de um dispositivo confiável e eficiente pode trazer benefícios tanto ambientais quanto econômicos para o setor agrícola.

1.3 Problemática

No contexto em constante evolução do agronegócio, diversos problemas surgem e precisam ser solucionados. Um desses problemas é o consumo excessivo de água durante o manejo das plantações. Esse problema se agrava quando se lida com produtores que não buscam a máxima eficiência no uso da água em suas culturas. Tanto os produtores quanto o planeta sofrem as consequências, com os produtores utilizando a água de forma ineficiente, resultando em gastos desnecessários, e o planeta enfrentando uma escassez crescente de recursos hídricos os impactos são sentidos em grande escala, prejudicando o planeta como um todo.

Além disso, os agricultores que buscam adotar tecnologias para evitar os efeitos negativos tanto econômicos quanto ambientais se deparam com obstáculos significativos no que diz respeito às tecnologias de medição. Os sensores, na maioria dos casos, são caros, o que desencoraja o interesse dos produtores. Isso implica grandes investimentos, como custos de manutenção, aquisição, instalação, entre outros, que não são atrativos para os agricultores (PAZ; TEODORO; MENDONÇA, 2000).

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo primário o desenvolvimento de um sensor capacitivo em altas frequências que possa medir o conteúdo volumétrico de água (do inglês *Volumetric*

Water Content, VWC) do solo.

1.4.2 Objetivo específico

Entre os objetivos específicos observados para este trabalho de conclusão de curso, estão:

- Revisar o estado da arte e definir a arquitetura baseando-se no desempenho e funcionalidade;
- Implementar e testar o circuito de aquisição que consiste no circuito de controle e transdutor;
- Definir a estratégia de calibração com sensor comercial;
- Calibrar o protótipo em um ambiente controlado;
- Medir o conteúdo volumétrico da água em um ambiente real;
- Analisar e comparar os dados e com o sensor comercial.

1.5 Estado da arte

Ao observar os trabalhos relacionados ao tema da agricultura inteligente, sensores no ambiente agrícola e assuntos similares, é possível identificar pesquisas na área que apresentam características distintas, porém compartilham objetivos bastante semelhantes. Alguns desses trabalhos propõem técnicas que permitem medições mais exatas, mas requerem um investimento maior. Por outro lado, existem técnicas que oferecem uma boa relação custo-benefício entre exatidão e investimento. Além disso, alguns trabalhos exploram a integração com padrões de sistemas já conhecidos, enquanto outros exploram novas abordagens.

Nesta subseção, é apresentado o estado da arte envolvendo dispositivos com objetivos semelhantes, como a medição do conteúdo volumétrico da água ou umidade do solo, entre outros. Essa revisão permitirá compreender as tecnologias existentes e as abordagens utilizadas nesse campo de pesquisa.

O trabalho apresentado por [Gonzalez-Teruel et al. \(2019\)](#) é abrangente em termos de desenvolvimento e avaliação de um sensor capacitivo de baixo custo. Nesse estudo, foi desenvolvido um sensor capacitivo com capacidade de conexão analógica e digital, utilizando a interface SDI-12, amplamente utilizada na área agrícola em conjunto com *dataloggers*.

Um microcontrolador ATmega 328p foi utilizado para criar um circuito isolado do sensor, evitando interferências eletromagnéticas com o microcontrolador. O sensor foi projetado com base em um modelo comum no mercado, que consiste em hastes paralelas e espaçadas, e

utilizou o ar como dielétrico. O circuito do sensor e os circuitos de controle foram dispostos em uma única placa, que foi enterrada no solo para medir o conteúdo volumétrico da água.

No modo analógico, o sensor realizava medições na faixa de 0 a 5 V, correspondentes a um intervalo de 0 a 100% do conteúdo volumétrico de água. No modo digital, as informações eram transmitidas por meio de software. Durante os testes de campo, foi observada uma variação cíclica no conteúdo volumétrico da água, provavelmente devido à alta temperatura durante o dia e a queda durante a noite. O autor também ressalta a importância de considerar a temperatura para realizar uma compensação adequada nas curvas de calibração.

O trabalho realizado por [Okasha et al. \(2021\)](#) consistiu no desenvolvimento de um sensor capacitivo baseado na constante dielétrica (ϵ_r) e inserido no meio de interesse, que é o solo. Para construir o sensor, uma placa de circuito impresso revestida com fibra de vidro, de grau NEMA FR-4, com área efetiva de 20 mm por 60 mm, foi utilizada. O circuito elétrico foi projetado com uma configuração de filtro passa-baixos e um detector de pico. A informação relevante é o pico da onda resultante do circuito integrado (CI) 555, que pode operar como um multivibrador monoestável configurado como um oscilador RC. Esse comportamento permitiu que a frequência do circuito estivesse próxima à frequência máxima alcançada pelo CI. A alimentação do circuito foi fornecida por uma placa solar de 120 W, eliminando a necessidade de conexão direta com a rede elétrica ou outros dispositivos de alimentação externos.

Os resultados obtidos foram compilados e apresentaram valores de capacitância entre 27 pF e 460 pF, com frequências medidas de 589,16 kHz e 34,50 kHz, respectivamente, enquanto as frequências calculadas foram de 589,46 kHz e 34,59 kHz. A umidade do solo foi medida e os dados coletados foram transformados em curvas, que posteriormente foram utilizadas para calibrar o sensor de acordo com as características específicas do solo em questão. Os valores de umidade do solo obtidos variaram de aproximadamente 0% a 70%.

O trabalho descrito em [Silva \(2005\)](#) comenta o uso de sensores capacitivos usando frequências no entorno de 1 MHz a 10 MHz, onde apresenta uma topologia utilizando o circuito integrado 74LS122 que funciona como multivibrador monoestável gatilhável, fabricado pela Texas Instruments. A fim de facilitar a leitura da frequência, foram utilizados circuitos integrados auxiliares para divisão de frequência e posterior aquisição dos dados. Valores de capacitâncias ficaram na faixa de 30 pF e 200 pF para as frequências anteriormente comentadas para as placas de fibra de vidro que foram usadas, após perceber a maior maleabilidade das placas de cobre quando comparada àquelas. Ao utilizar regressões lineares, foi possível estimar a curva de umidade do solo a partir dos dados de resposta coletados pelo sensor. Por fim, é possível observar a resposta do sensor à variação de umidade na ordem de segundos, enquanto a estabilização ocorreu em aproximadamente uma hora e dez minutos.

No artigo de [Tomar e Patidar \(2019\)](#) é apresentado o VH400, sensor baseado no método capacitivo. A análise conduzida foi feita de duas formas, a primeira análise foi a resposta do sensor em tensões contínuas e a segunda foi com relação a tensão alternada para frequências

de 1 a 10 kHz. As três amostras foram separadas em recipientes de 250 ml, sendo 50 ml de solo e 50 ml de água, durante uma semana. Os gráficos apresentados demonstram a variação de água em função da tensão elétrica. Os resultados demonstram uma diminuição da tensão no decorrer dos dias que se passaram em sua característica de tensão contínua. Obtendo valores de, aproximadamente, 1,367 V no primeiro dia e 0,161 V no sexto dia na amostra 1, e valores bem similares na amostra dois e três. Possibilitando medir não só a quantidade volumétrica de água, mas também a condutividade do solo. Na análise de tensão alternada do sensor nota-se um aumento de frequência enquanto a capacitância diminui, correspondendo a teoria apresentada. Valores de frequência de aquisição corresponderam a faixa de 1 a 1 MHz, onde valores de capacitância para frequências acima de 10 kHz foram estáveis.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Característica e hidrologia do solo

O solo é um sistema complexo, heterogêneo e poroso, composto por partículas de diferentes tamanhos e distribuições, tanto em termos de volume quanto de superfície, além de abrigar organismos e minerais.

2.1.1 Volume

Para determinar a quantidade de água presente no solo, é comum considerar o solo como um paralelepípedo em três dimensões, no qual uma das faces corresponde à superfície do solo. Essa abordagem permite uma generalização da forma do solo e auxilia na compreensão do seu comportamento hidrodinâmico (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

Sabe-se que o volume de um paralelepípedo é dado por:

$$V = x \cdot y \cdot z,$$

em que, x é a largura, y o comprimento e z a altura. Na equação acima, considera-se que o solo consiste em um sistema poroso formado por partes. Assim, o volume aparente é solo dado por:

$$V = V_s + V_a + V_{ar}.$$

Sendo V_s , V_a e V_{ar} o volume do solo, da água e do ar, respectivamente. Pode-se estabelecer uma expressão para a massa total do solo em termos de seus elementos constitutivos:

$$m = m_s + m_a + m_{ar}, \quad (2.1)$$

em que m_s é a massa seca do solo, m_a é a massa de água do solo e m_{ar} , a massa de ar presente no solo.

Ao adicionar água ao solo, ou seja, saturando-o, os espaços porosos que antes contêm ar, são preenchidos com água. Quando o solo perde água, esses espaços são novamente preenchidos com ar. Essa relação entre a quantidade de água e a quantidade de ar é inversamente proporcional. Em outras palavras, quanto maior a quantidade de água, menor a quantidade de ar e vice-versa. Devido à massa do ar ser consideravelmente menor, ela pode ser desprezada na equação (2.1). Em uma forma mais simplificada, a equação se torna:

$$m \approx m_s + m_a, \quad (2.2)$$

Embora não seja visível a olho nu, o solo contém uma quantidade significativa de água armazenada, atuando como um reservatório em regiões com precipitações esporádicas. A água presente no solo pode ser caracterizada pelo seu conteúdo volumétrico de água (Θ_v), que representa a quantidade de água presente no solo em relação ao volume total, e pelo seu potencial matricial do solo (Ψ), que descreve a força com a qual a água é retida na matriz do solo (RAI; SINGH; UPADHYAY, 2017).

2.1.2 Definição do conteúdo volumétrico de água

O conteúdo volumétrico da água do solo é uma informação importante, pois está intimamente relacionada a técnicas da agricultura, hidrologia e para a tomada de decisões.

2.1.2.1 Massa relativa de água

Massa de água relativa do solo pode ser expressa pela razão entre a massa de água e a massa do solo seco que corresponde à expressão seguinte:

$$\Theta_m = \frac{\text{massa do solo molhado} - \text{massa do solo seco}}{\text{massa do solo seco}} = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa do solo seco}} \quad (2.3)$$

2.1.2.2 Volume relativo de água

Expressar as informações relativas à água do solo em termos de volume é amplamente considerado vantajosa em várias áreas de estudo. O volume relativo de água presente no solo pode ser representado de duas maneiras principais: em termos de volume absoluto ou em termos da massa relativa da água, levando em consideração a densidade aparente do solo. Essa abordagem é particularmente relevante em diferentes contextos acadêmicos e científicos, incluindo hidrologia, gerenciamento de recursos hídricos, drenagem, infiltração, modelagem hidrológica e estudos agrícolas (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

Nos estudos de hidrologia e gerenciamento de recursos hídricos, é essencial medir de maneira exata a quantidade de água armazenada no solo para avaliar sua disponibilidade para uso humano, irrigação de culturas e recarga de aquíferos. Nesse sentido, expressar as informações em termos de volume fornece uma medida direta e concreta, permitindo uma compreensão mais precisa das reservas hídricas do solo (OECD, 2015).

Além disso, ao investigar a capacidade de drenagem e infiltração do solo, a expressão dos resultados em termos de volume é crucial para avaliar a quantidade de água que pode ser absorvida ou escoada pelo solo. Essa abordagem facilita a comparação direta da capacidade

de retenção e escoamento entre diferentes tipos de solo e permite uma análise dos processos hidrológicos envolvidos (ASSIS et al., 2009).

Em estudos agrícolas, o conhecimento do volume de água retido no solo é de suma importância para determinar as necessidades de irrigação das culturas, bem como para avaliar a capacidade de armazenamento de água disponível para as plantas. Expressar as informações em termos de volume nesse contexto fornece uma base sólida para o planejamento e gerenciamento eficiente dos recursos hídricos nas atividades agrícolas. Em suma, a abordagem de expressar as informações relacionadas à água do solo em termos de volume apresenta inúmeras vantagens, permitindo uma análise mais precisa, comparável e abrangente dos processos hidrológicos e do gerenciamento de recursos hídricos (PEQUENO et al., 2002).

A quantidade volumétrica de água do solo pode ser expressa pela equação a seguir:

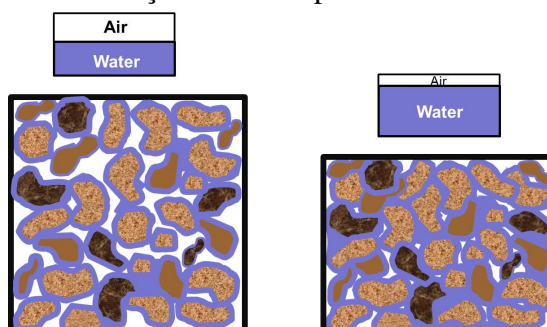
$$\Theta_v = \frac{\text{volume de água}}{\text{volume aparente do solo}} = \frac{\text{massa de água/densidade da água}}{\text{volume aparente do solo}} \quad (2.4)$$

São diversas as formas usadas para definir os parâmetros relacionando água e solo e cada uma delas desempenha um papel fundamental na compreensão e na caracterização dos processos hidrológicos e da interação entre a água e o solo (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

2.1.3 Porosidade

Ao analisar o solo como um sistema poroso, é possível identificar solos com maior porosidade, nos quais há um espaço significativo entre as partículas sólidas, geralmente ocupado predominantemente por outras partículas, como o ar. Em contrapartida, existem os solos menos porosos onde apresentam pouca ou nenhuma quantidade de poros. Quando os poros são preenchidos em sua totalidade com partículas líquidas, de água por exemplo, eles são conhecidos como solos saturados (RAI; SINGH; UPADHYAY, 2017). A Figura 1 ilustra esse conceito.

Figura 1 – Diferença entre solo poroso e um menos poroso.



Fonte: UME (2018)

A compactação se refere a um processo que descreve o aumento na massa do solo por unidade de volume (aumento na densidade aparente) sob uma carga aplicada externamente ou

sob mudanças na pressão interna da água dos poros. No laboratório, a compactação do solo se refere à compressão de pequenas amostras de solo, enquanto no campo, mudanças tridimensionais na densidade aparente, distribuição do tamanho dos poros e resistência de um volume de solo elemental em profundidade e lateralmente estão envolvidas. Ou seja, a compactação do solo comprime os poros, reduzindo o espaço entre partículas (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

Acompanhando a compactação do solo, ocorre uma redução nos poros do solo e uma deterioração das funções desses poros, que impactam negativamente a distribuição e mobilidade de fluidos no solo, como o ar e a água. Além disso, a deformação do solo causada pela compactação geralmente está ligada a uma diminuição de volume, principalmente resultante da destruição dos poros de maior tamanho, ao passo que os poros mais finos tendem a aumentar (HUANG; HORN; REN, 2021).

2.1.4 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica do solo avalia a capacidade da água no solo de conduzir corrente elétrica. Esse processo eletrolítico ocorre principalmente através dos poros preenchidos com água. Cátions e ânions provenientes de sais dissolvidos na água do solo transportam cargas elétricas e conduzem a corrente elétrica. Portanto, a concentração de íons determina a EC do solo (NRCS, 2011).

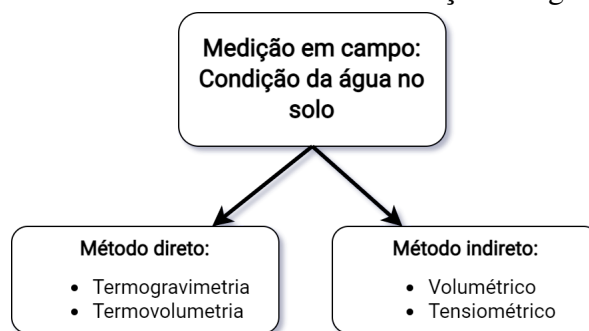
2.2 Técnicas de medição

Para medir a condição da água no solo, geralmente são utilizados dois métodos: o método direto e o método indireto. No método direto, são empregadas técnicas como termogravimetria e termovolumetria. Por outro lado, no método indireto, são utilizadas técnicas volumétricas e tensiométricas, conforme ilustrado na Figura 2. A condição da água no solo, para o método indireto, é compreendida de duas formas. A primeira forma diz respeito à quantidade de água presente no solo, conhecida como “conteúdo de água do solo” (SWC, do inglês *soil water content*). A segunda forma refere-se à força com que a água é retida na matriz do solo, chamada de “potencial da água” (SWP, do inglês *soil water potential*).

O método direto é utilizado para determinar o valor real de uma amostra, seja em termos de peso ou volume. Entretanto, é importante ressaltar que algumas dessas técnicas são destrutivas, ou seja, limitam a quantidade de medições possíveis dentro da mesma amostra (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

Além disso, requerem mão de obra qualificada para a manipulação das amostras, bem como um local apropriado para realizar o procedimento. Também devem ser considerados os custos relacionados ao transporte, caso necessário. Embora essas técnicas não sejam amplamente utilizadas na prática para medições diretas, são comumente empregadas para a calibração

Figura 2 – Métodos relacionados a condição da água no solo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

de outros sensores.

Por outro lado, para obter informações através do método indireto, utiliza-se uma variável secundária que é relacionada à variável primária. Esse método pode ser categorizado em duas técnicas: volumétrica, que estima o volume da amostra, e tensiométrica, que avalia o potencial matricial da amostra. O método indireto envolve o uso de sensores que medem grandezas associadas à grandeza de interesse. Entre os tipos de sensores volumétricos, destacam-se os sensores capacitivos, de espalhamento de nêutrons, radar de penetração do solo, entre outros. Já para os sensores tensiométricos, pode-se mencionar o tensiômetro, sensor de matriz granular, dissipação de calor, psicrômetro de solo. (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

2.2.1 Técnicas de medição

Serão apresentados a seguir alguns dos métodos utilizados na medição da água do solo, cada um com suas características e princípios específicos. Esses métodos fornecem diferentes abordagens e permitem uma avaliação abrangente da umidade do solo em diversas condições.

2.2.1.1 Método gravimétrico

É um tipo de técnica direta e destrutiva que consiste na obtenção de uma amostra do solo. A amostra é pesada inicialmente molhada e então é seca para remover todas as partículas de água absorvidas. A técnica convencional é levar a amostra por um processo de secagem a aproximadamente 105 graus Celsius até que a massa comece a se estabilizar. Entretanto, esse tempo de espera requer, usualmente, entre 24 e 48 horas, podendo mudar dependendo do peso, umidade e outras características do solo. Após o término da secagem a, diferença de peso de antes e depois do processo vai caracterizar a quantidade de água presente na amostra coletada. Isso traz uma vantagem de ser um processo barato e direto que traz fidelidade maior aos dados (OR; WRAITH; WARRICK, 2002). Caso haja necessidade de atualização constante sobre a informação do conteúdo volumétrico de água do solo em um curto intervalo de tempo, essa técnica não será indicada.

2.2.1.2 Método nuclear

De acordo com (OR; WRAITH; WARRICK, 2002) o método nuclear é um método indireto e não destrutivo comumente utilizado para medições com maior grau de repetição. Ele é baseado na capacidade da molécula de hidrogênio (H) de diminuir a velocidade dos nêutrons. Um tubo de acesso é inserido no solo para posterior inserção da sonda, a qual emite neutros de alta energia, entorno de 2 a 4 MeV, radialmente no solo o qual acaba absorvendo parte da energia. Essas colisões com o hidrogênio, que tem massa similar à dos nêutrons, causam uma significativa queda na energia cinética, diminuindo a velocidade nos nêutrons. Quando a velocidade dos neutros diminui o suficiente, é gerado um campo de energia em volta da sonda que, ao mesmo tempo, coleta o fluxo de energia que corresponde proporcionalmente ao nível de hidrogênio presente no solo, o qual é um fonte primária de uma molécula de água. Uma desvantagem desse método é sua esfera de influência. Estima-se que podem variar de 15 cm em um solo molhando a 70 cm em solo seco. Isso traz grande risco, pois uma quantidade desses nêutrons pode acabar escapando pela superfície e acabar prejudicando a saúde por se tratar de radiação. Em contrapartida, esse método possibilita medição repetidas vezes da quantidade volumétrica de água (Θ_v). Além disso, precisa-se de calibração específica para cada tipo de solo e sua característica radioativa, que inviabiliza medições próximas à superfície.

2.2.1.3 Método eletromagnético

Dentro da categoria dos métodos eletromagnéticos, é possível identificar os métodos elétricos e os dielétricos, estes últimos relacionados ao campo magnético. Os métodos que se baseiam nas alterações elétricas do solo, decorrentes de variações no conteúdo volumétrico de água, têm sido utilizados há décadas. Um exemplo de estudo nesse contexto é o trabalho de Smith-Rose e Appleton (1933), que apresentou uma relação matemática obtida de maneira prática entre características do solo e a condutividade.

2.2.1.3.1 Método da resistividade elétrica

Devido às características intrínsecas dos materiais que demonstram resistência elétrica, foram desenvolvidos sensores de baixo custo e simplicidade para monitorar a presença de água no solo e seus componentes. Esses sensores, frequentemente concebidos com uma estrutura delgada ou concêntrica, são comumente fabricados a partir de gesso, devido à sua capacidade de dissolução em meio aquoso e são empregados para inferir o potencial hídrico do solo (OR; WRAITH; WARRICK, 2002). Essa característica possibilita um maior fluxo de corrente entre os eletrodos, resultando em alterações na resistência elétrica do sensor.

A obtenção de medições mais exatas exige a prévia calibração desses sensores, que leva em consideração o equilíbrio do sensor com as propriedades do solo. A medição com esse tipo de sensor pode ser conduzida por meio de instrumentos simples de resistência elétrica ou por dispositivos inteligentes e automatizados. Essa simplicidade de medição é uma vantagem,

uma vez que não demanda a utilização de equipamentos complexos para obter leituras (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

2.2.1.3.2 Reflectometria no domínio do tempo (TDR)

Com o avanço das tecnologias de sensoriamento de sinais propagados por linhas de transmissão e guias de onda, diversas abordagens foram introduzidas para medir as propriedades dielétricas do solo. Entre essas abordagens, destaca-se a reflectometria no domínio do tempo, capaz de avaliar a constante dielétrica do solo ao redor de guias de onda em frequências que variam de mega-hertz a giga-hertz. Utilizando informações como o tamanho do guia de onda, a velocidade de propagação da onda e o tempo de resposta do pulso é possível inferir a constante dielétrica (OR; WRAITH; WARRICK, 2002).

A notável discrepância entre os valores da permissividade relativa (ϵ_r) da água com valor aproximado 80 e dos componentes do solo com valor aproximado de 1 conduz a duas abordagens básicas para relacionar permissividade e o teor de umidade (Θ).

A primeira abordagem é empírica, na qual são formuladas expressões matemáticas baseadas apenas em dados observados, sem a incorporação de um modelo físico. Um exemplo amplamente reconhecido é a equação polinomial de terceiro grau proposta por Topp, Davis e Annan (1980), a qual estabelece uma relação entre a constante dielétrica (ϵ_r) e o conteúdo volumétrico do solo (Θ_v) para diversos tipos de solo.

A segunda abordagem baseia-se em modelos físicos, considerando a composição do solo em termos de sua porção úmida (que contém água) e a porção de partículas do solo. Esse enfoque é conhecido como modelo misto, conforme comenta Or, Wraith e Warrick (2002).

2.2.1.3.3 Reflectometria no domínio da frequência (FDR)

De acordo com Or, Wraith e Warrick (2002), muitos dos novos sensores e seus métodos de medição estão emergindo como combinações de técnicas capacitivas, reflexivas e de translação em frequência. Esses métodos compartilham a utilização da permissividade relativa como parâmetro de interesse. Assim, a reflectometria no domínio de frequência (FDR, do inglês Frequency Domain Reflectometry) também leva em consideração a permissividade relativa do solo e suas variações para modificar a frequência de saída de um circuito oscilador. Essa técnica emprega sondas posicionadas acerca de 30 cm da superfície do solo para efetuar a medição. A aplicação da FDR demanda equipamentos mais sofisticados devido à complexidade de seu circuito em comparação ao método capacitivo. No entanto, a FDR exhibe uma maior sensibilidade¹ em relação à composição do solo, como indicado por Or, Wraith e Warrick (2002).

¹ “Quociente entre a variação dum indicação dum sistema de medição e a variação correspondente do valor da grandeza medida” (JCGM, 2008).

2.2.1.3.4 Método capacitivo ou dielétrico

Os capacitores possuem a capacidade de armazenar energia na forma de campo elétrico para uso futuro sob certas circunstâncias. Essa capacidade de armazenamento está diretamente ligada ao meio dielétrico envolvido. De acordo com [Baumhardt, Lascano e Evett \(2000\)](#), o método capacitivo é viável determinar o teor volumétrico do solo através de variações na frequência, que estão relacionadas à permissividade da região do solo em contato com as placas capacitivas. Vários fatores relevantes influenciam a eficácia desse método, incluindo a caracterização do solo, considerações sobre a abordagem destrutiva ou não destrutiva, frequência aplicada, temperatura, natureza do material e custos associados ([JILANI, 2012](#)).

É crucial destacar que o solo apresenta uma característica conhecida como permissividade relativa, que varia de acordo com as características regionais e os componentes presentes na composição do solo ([Pozdnyakova, 1999](#)). Essa flutuação na permissividade do solo pode influenciar as suas propriedades elétricas e, por conseguinte, as medições efetuadas nesse ambiente. Com o intuito de fornecer uma compreensão abrangente, a tabela a seguir apresenta os principais materiais encontrados em diferentes tipos de solo, proporcionando informações relevantes sobre a composição e as possíveis variações nas propriedades dielétricas desses solos.

Tabela 1 – Constante dielétrica dos materiais que formam a maioria dos solos.

Material	Constante dielétrica relativa (ϵ_r)
Ar	1
Água	80 à 20 °C
Gelo	3 à -5 °C
Basalto	12
Granito	79
Aretino	911
Barro	3.5
Areia seca	2.5

Fonte: [Noborio \(2001\)](#)

Como demonstrado na Tabela 1, os materiais exibem uma ampla variação nas permissividades relativas. Nos extremos da tabela, encontramos o ar e a água, com permissividade relativa de 1 e 80, respectivamente.

Devido à sua natureza, o método capacitivo não fornece uma medida direta da umidade ou do conteúdo volumétrico do solo. Nesse método, a obtenção da medida de umidade envolve, primeiramente, relacionar a resposta do circuito à frequência, calcular a capacitância equivalente do solo e, em seguida, correlacionar essa medida com a umidade. Isso ocorre ao relacionar a interação entre o campo elétrico gerado pelas placas capacitivas e o meio dielétrico do solo, cuja constante dielétrica está associada ao conteúdo de água presente ([ZAZUETA, 1994](#)).

Sendo assim, a variação de água no solo modifica a permissividade, o que consequentemente altera a capacitância das sondas. Isso resulta em mudanças detectáveis na resposta do

circuito, estabelecendo, por fim, uma relação entre a resposta capacitiva e o conteúdo volumétrico de água no solo. A equação que associa a permissividade relativa à capacitância do capacitor de placas paralelas é ilustrada a seguir:

$$C = 8,85 \times 10^{-12} \epsilon_r \frac{A}{d}, \quad (2.5)$$

sendo, A a área das placas em metros quadrados (m^2) e d a distância entre as placas.

Entretanto, é essencial enfatizar que a medição da umidade do solo por método capacitivo requer um processo de calibração específico para cada tipo de solo. Isso ocorre devido às características únicas de cada solo, como composição, estrutura, que influenciam nas propriedades dielétricas do meio. Fatores como a temperatura e a salinidade do solo também podem impactar as medições capacitivas (NOBORIO, 2001). Além disso, buscando diminuir a influência da composição química, textura e estrutura do solo recomenda-se a operação em altas frequências entre 30 MHz e 200 MHz (ELLER; DENOTH, 1996).

O método capacitivo proporciona uma abordagem não invasiva e relativamente simples para medir a umidade do solo, tornando-o amplamente utilizado em pesquisas e aplicações práticas. No entanto, é fundamental ter consciência das limitações e desafios associados a esse método, visando alcançar resultados confiáveis (SILVA, 2005).

A técnica, é comum inserir dois eletrodos no solo, que podem assumir a forma de placas de cobre de vários formatos ou anéis cilíndricos feitos de materiais metálicos. Essa técnica se destaca devido a um conjunto de características que a tornam facilmente viável. A abordagem para determinar o valor da capacitância pode envolver a medição do tempo de carga do capacitor (GONZALEZ-TERUEL et al., 2019), o uso de um método de fonte de corrente constante (KOJIMA et al., 2016), a medição da capacitância em altas frequências (GAO et al., 2018), entre outros métodos. Essa técnica apresenta oferece uma boa resposta à quantidade de água presente no solo, possibilitando medições em tempo real. Adicionalmente, sensores de temperatura podem ser empregados para compensar as curvas de calibração. Outra vantagem dessa técnica é que o *hardware* necessário é relativamente mais barato quando comparado às técnicas FDR e TDR (OR; WRAITH; WARRICK, 2002),(IAEA, 2008),(MUÑOZ-CARPENA, 1969).

2.3 Osciladores LC

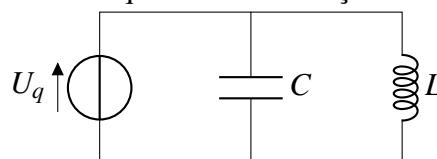
Algumas das técnicas capacitivas utilizam como parte oscilatória um circuito oscilador LC. Um oscilador LC é composto fundamentalmente por dois elementos: um indutor e um capacitor. Juntos, esses componentes possuem propriedades físicas que possibilitam a criação de um oscilador através do armazenamento de energia nos campos magnético e elétrico. A interação desses campos com o ambiente circundante influencia a quantidade de energia armazenada. Ademais, aspectos relacionados à construção também exercem um papel significativo na capacidade de armazenamento de energia (BOYLESTAD, 2013). A Figura 3 ilustra o circuito LC

ideal, com impedância resistiva nula, cuja a frequência de oscilação do circuito é determinada pela equação seguinte:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.6)$$

Ao observar a equação (2.6) observa-se um relação da capacitância com a frequência de ressonância, permitindo caracterizar o conteúdo hídrico do solo devido a relação entre as variáveis inversamente proporcionais.

Figura 3 – Circuito LC com frequência de oscilação definida pela equação (2.6).



Fonte: (BOYLESTAD, 2013)

2.4 Interface de dados em série a 1200 baud (SDI-12)

O SDI-12 (do inglês, *Serial Data Interface at 1200 baud*) é um padrão de interface que possibilita a conexão entre gravadores de dados alimentados por bateria e sensores projetados para a aquisição de dados ambientais (do inglês *Environmental Data Acquisition*, EDA) (GROUP,).

Ainda de acordo com Group (), a EDA é realizada por meio da utilização de sensores em conjunto com um gravador de dados, que é responsável por coletar e armazenar as informações adquiridas. O protocolo SDI-12, viabiliza a transferência das medições obtidas por sensores inteligentes para o gravador de dados. Tais sensores inteligentes possuem a capacidade de efetuar medições, realizar cálculos com base nas leituras brutas dos sensores e disponibilizar os dados medidos em diferentes unidades comumente empregadas nas áreas de engenharia. Por exemplo, um sensor de pressão compatível com o protocolo SDI-12 pode efetuar diversas medições de pressão, calcular médias dessas leituras e, conseqüentemente, fornecer a pressão medida em unidades como libra por polegada quadrada, polegadas de mercúrio, bares, milibares ou torrs. O microprocessador incorporado ao sensor é encarregado de executar os cálculos necessários, converter as leituras do sensor para unidades apropriadas e empregar o protocolo SDI-12 para transferir os dados ao gravador de dados.

2.5 Datalogger

Um registrador de dados (do inglês *datalogger*), é um dispositivo eletrônico encarregado de registrar os resultados provenientes das leituras de transdutores. Ele possui a capacidade de armazenar os dados coletados ao longo de um intervalo de tempo predeterminado ou capturar os dados presentes no momento da conexão entre os dispositivos. Diversos tipos de

dataloggers estão disponíveis, com alguns sendo mais abrangentes que outros em termos de funcionalidades. Eles podem ser alimentados por baterias ou outra fonte de energia, dependendo do modelo. Adicionalmente, certos *dataloggers* são programáveis para conduzir coletas em intervalos específicos. Alguns modelos ainda vêm equipados com sensores climáticos, permitindo a associação dos dados registrados com informações sobre as condições atmosféricas vigentes (DUNNICLIFF, 1993).

3 DESENVOLVIMENTO

Durante o desenvolvimento do sensor foram analisados os tópicos comentados anteriormente. Para o desenvolvimento de um sensor que pudesse atuar em altas frequências, mantendo a confiabilidade do protótipo, foi escolhido um sensor baseado no método capacitivo. Os capítulos que seguem demonstram a estruturação, montagem e metodologia aplicadas no desenvolvimento do protótipo.

3.1 Materiais e métodos

Para o desenvolvimento deste estudo, foram empregados um laptop e o software Proteus¹ para a elaboração do *layout* esquemático e programação da placa usando a plataforma Arduino², além de dois sensores comerciais. O primeiro, um sensor TEROS 12 da METER GROUP, será referenciado neste trabalho como “S2”. O segundo sensor é o Soil Moisture Sensor V1.2, designado como “S3”.

O sensor TEROS 12 ostenta uma reputação no mercado devido à sua capacidade de mensuração precisa da umidade do solo. Esse sensor comercial é compatível com os padrões SDI-12 ou DDI (*Digital Data Interface*), operando por meio de um método capacitivo com uma frequência de 70 MHz. Vale salientar que o TEROS 12 possui um sensor de temperatura incorporado, viabilizando a obtenção simultânea de dados sobre a umidade e a temperatura do solo. Além disso, ele é capaz de medir a condutividade elétrica (do inglês, *electrical conductivity*, EC) aparente do solo. Sua robustez e precisão lhe conferem popularidade em aplicações variadas, incluindo monitoramento de umidade do solo em setores como a agricultura e a pesquisa científica (METER, 2022). A Figura 4 ilustra a aspecto visual do sensor TEROS 12.

O sensor de umidade do solo conhecido como Soil Moisture Sensor V1.2 mostrado na figura 5 é projetado com base no circuito integrado TLC555. Esse circuito integrado oferece uma faixa de frequência de até 2 MHz, permitindo o funcionamento adequado do sensor (JAKUS, 2020). O uso desse circuito integrado proporciona funcionalidades necessárias para medir a umidade do solo em diversas aplicações, como agricultura e estudos científicos. A exatidão e a confiabilidade das medições podem ser alcançadas por meio desse dispositivo.

3.1.1 Seleção da sonda capacitiva

Ao examinar os estudos realizados na área de sensores capacitivos, nota-se uma ampla variedade de projetos de sondas utilizados em campo. Entre esses projetos, destacam-se os de formatos em garfo, como vistos em Borhan e Parsons (2004), Louki e Al-Omran (2022)

¹ Site oficial do programa Proteus: <https://www.labcenter.com/>

² Site oficial Arduino: <https://www.arduino.cc/>

Figura 4 – Sensor Capacitivo TEROS 12.



Fonte: [METER \(2022\)](#)

Figura 5 – Sensor de Umidade Capacitivo com Proteção Contra Oxidação.



Fonte: [Jakus \(2020\)](#)

e [Gonzalez-Teruel et al. \(2019\)](#), o perfilamento utilizado por [Kojima et al. \(2016\)](#), as sondas anulares de [Gao et al. \(2018\)](#).

No contexto deste projeto, optou-se pela adoção da sonda do tipo coplanar de camada única (*single layer*), conforme estudada em [Junior, Rodrigues e Antayhua \(2021\)](#). Essa sonda foi projetada e analisada para operar em frequências superiores a 50 MHz, apresentando uma frequência de autoressonância de cerca de 137 MHz quando inserida no solo. O sensor foi desenvolvido e montado em uma placa de substrato FR-4 (fibra de vidro), contando com uma fina camada de cobre que permite a condução de elétrons e a interação com campos elétricos e magnéticos. A representação visual da sonda mencionada pode ser observada na [Figura 6](#).

Figura 6 – Sonda coplanar implementada para o presente trabalho.

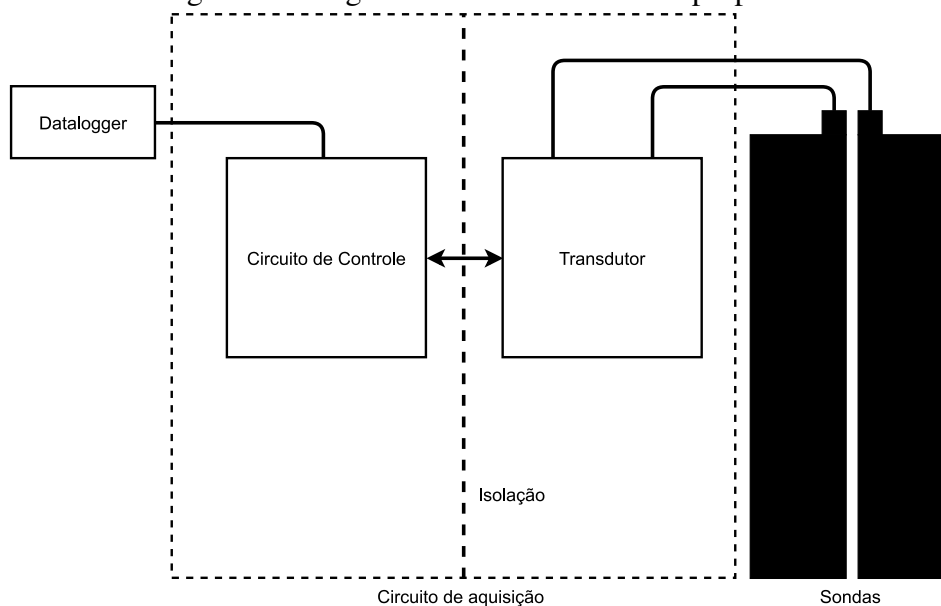


Fonte: Junior, Rodrigues e Antayhua (2021).

3.1.2 Diagrama de blocos do sensor

O circuito aquisição pode ser observados como circuito de controle e circuito transdutor. O diagrama de bloco do protótipo é apresentado na figura 7

Figura 7 – Diagrama de blocos do sensor proposto.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a elaboração do circuito de controle, elementos como isolação dos circuitos, transdutor e de controle, e microcontrolador foram baseados no trabalho de pesquisa de [Gonzalez-Teruel et al. \(2019\)](#). Já para o circuito transdutor, adotou-se a abordagem proposta por [Gao et al. \(2018\)](#), que utiliza um circuito oscilador tanque LC em conjunto com o circuito integrado MC1648P como ponto de partida. Essa abordagem permite a o dispositivo atuar em frequências acima das faixas de utilização em que sonda foi projetada.

Durante o processo de seleção da topologia empregada, artigos foram analisados levando-se em consideração as técnicas utilizadas, frequência de operação, complexidade da topologia

do circuito e custos associados aos dispositivos. O quadro 1 mostra um resumo dos trabalhos analisados.

Quadro 1 – Tabela comparativa entre as tecnologia de sensores capacitivos utilizadas em trabalhos da área.

Autor	Tipo de técnica	Frequência de operação	Comparado com
Gao et al. (2018)	Oscilador LC controlado por tensão	100-150MHz	Diviner2000 (99%precisão)
Protim Goswami, Montazer e Sarma (2019)	Tensão de pico em ponte Wheatstone	1KHz @ 5V	-
Schlaeger, Hübner e Becker (2005)	Oscilador em anel (<i>digital inverter</i>)	Dependente da Linha de Transmissão	-
Saeed et al. (2019)	Amplificação de diferença	100MHz	-
Kojima et al. (2016)	Sensores capacitivos comerciais	62kHz	-
Gonzalez-Teruel et al. (2019)	Oscilador RC	2k-100k	MPS-6(Decagon)
Shigeta et al. (2018)	Sensor capacitivo	50k-3MHz	-
Rêgo Segundo et al. (2017)	Ponte auto balanceada (filtro)	Dependente do microcontrolador	-
Schubert et al. (2017)	Medida de capacitância (LPF + Detector de pico)	50-500kHz	-
Hornero et al. (2017)	Tempo de carregamento do capacitor para um tensão de limiar	4MHz	-

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Circuito de Aquisição

Como comentado anteriormente, O circuito de aquisição é constituído por dois circuitos distintos: o circuito de controle e o circuito transdutor. O circuito de controle assume a responsabilidade de controlar, medir e comunicar os dados adquiridos, viabilizando sua subsequente transmissão aos *dataloggers*. Por sua vez, o circuito transdutor tem a função de emitir um sinal de frequência apropriada, permitindo que o sensor de controle efetue a leitura da grandeza desejada. Essa frequência é determinada com base nas características das sondas e nas variações no conteúdo volumétrico de água do solo. Isso assegura que o sensor de controle possa realizar a aquisição dos dados de maneira precisa e confiável.

Dentro desse contexto, os *dataloggers* desempenham a função de receber os dados provenientes do circuito de aquisição. Eles operam como dispositivos encarregados de registrar e armazenar as informações adquiridas através das medições e aquisições realizadas por esse circuito.

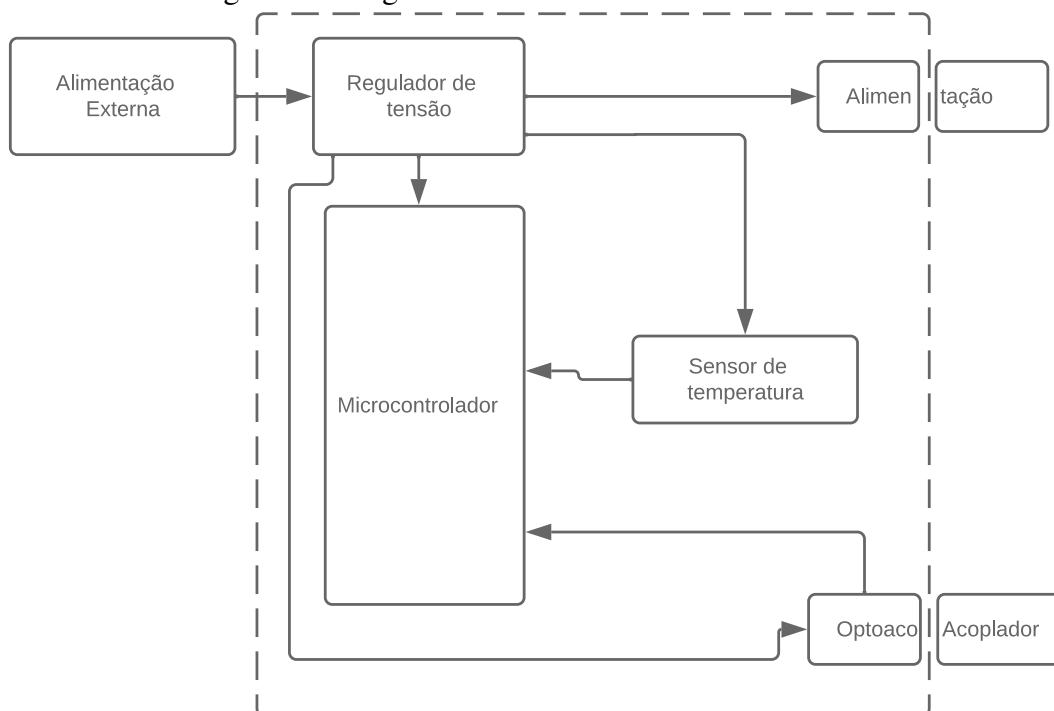
3.2.0.1 Circuito de Controle

O circuito de controle foi concebido para receber os dados provenientes do circuito transdutor, conforme apresentado na seção subsequente, interpretar esses dados provenientes das leituras e viabilizar a transferência dos dados com *dataloggers* ou quais quer outros dispositivos capazes de decodificar os sinais emitidos.

A seleção da plataforma Arduino foi tomada visando a redução dos custos de produção do dispositivo. Além disso, o Arduino é uma plataforma altamente flexível, contando com uma comunidade ampla e diversificada de bibliotecas de código aberto, o que facilita o desenvolvimento de soluções eficazes em várias áreas de pesquisa (TEAM, 2021). O diagrama de blocos do circuito de controle pode ser visualizado na Figura 8.

O circuito de controle também foi projetado levando em consideração a necessidade de baixo consumo de energia, visando maximizar a eficiência e o aproveitamento do sensor e

Figura 8 – Diagrama de blocos do circuito de controle.



Fonte: Elaborada pelo autor.

das leituras quando o dispositivo é implantado em campo. O diagrama esquemático do circuito pode ser visto no Apêndice A e seu modelo 3D na Figura 12.

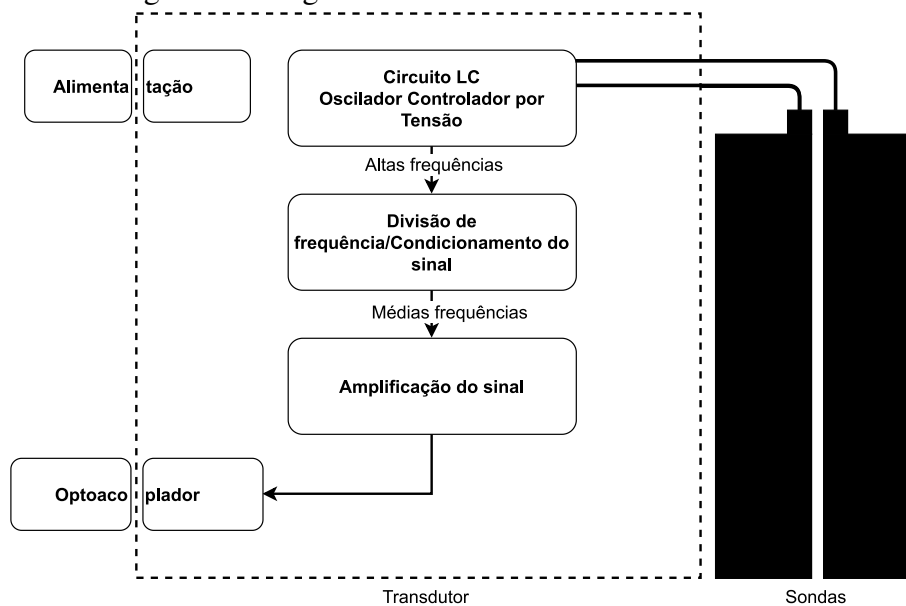
3.2.0.2 Circuito Transdutor

O circuito transdutor é composto por uma combinação de circuitos integrados com a finalidade de gerar e modular um sinal a ser avaliado pelo microcontrolador presente no circuito de controle. O primeiro elemento desse circuito é o oscilador LC Controlado por Tensão, responsável por gerar frequências elevadas entre 50 MHz e 200 MHz. Logo em seguida, um circuito integrado realiza a divisão da frequência do sinal de saída do oscilador, permitindo que o microcontrolador efetue a leitura de forma apropriada. Por fim, devido à atenuação de sinal introduzida pelo circuito integrado divisor de frequência, torna-se necessário amplificar o sinal até níveis compatíveis com a faixa de aquisição das portas de entrada do microcontrolador. O fluxo descrito, junto ao diagrama correspondente, pode ser visualizado na Figura 9.

3.2.0.2.1 Oscilador LC Controlado por Tensão (VCO)

Um oscilador LC controlado por tensão é um componente eletrônico que gera uma oscilação de alta frequência por meio de um circuito constituído por um indutor (L) e um capacitor (C). A frequência dessa oscilação é determinada pela variação da tensão aplicada ao circuito, permitindo ajustar a frequência do sinal gerado conforme a tensão de controle.

Figura 9 – Diagrama de blocos do transdutor detalhado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Um exemplo de circuito integrado utilizado no protótipo é o MC1648P da Motorola. Na representação do circuito, ilustrada na Figura 10, esse circuito integrado é referido como um "resistor negativo". Essa denominação se deve ao fato de que, em certas configurações, o CI MC1648P é capaz de fornecer uma resistência negativa, o que significa que ele pode gerar uma queda de tensão inversamente proporcional à corrente aplicada.

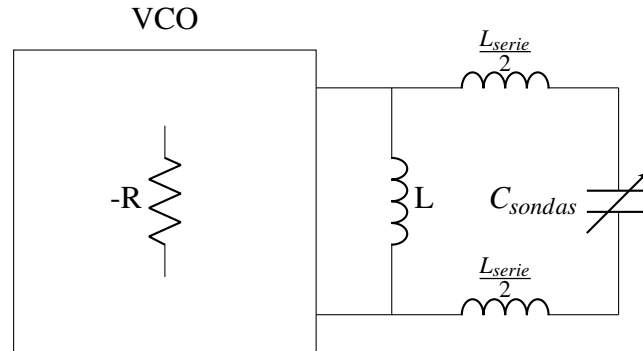
Na Figura 10, também é possível identificar o componente denominado “trilhas de alimentação” (L_{serie}) que é incluído devido aos pontos de alimentação, os quais exercem uma influência significativa no comportamento do oscilador em altas frequências. Como resultado, os pontos de alimentação também contribuem com um valor de indutância que é incorporado à equação de oscilação. Por outro lado, o valor do capacitor na equação varia conforme as sondas no solo, as quais alteram a capacitância do sistema.

Na mesma figura, observa-se o componente , que representa um indutor modelado. No entanto, é relevante enfatizar que, mesmo com a inclusão das trilhas de alimentação, a frequência de autorressonância permaneceu acima dos 50 MHz, que foi o objetivo estabelecido para as sondas capacitivas descritas por (JUNIOR; RODRIGUES; ANTAYHUA, 2021). Além disso, Portanto, o indutor modelado não é considerado, uma vez que não afeta a faixa de frequência desejada. Contudo, no circuito, o valor de 68 nH foi fixado para o indutor L, a fim de manter a frequência de operação do circuito dentro da faixa do VCO.

Dessa forma, é estimada a frequência de ressonância a partir da equação (3.1) que incorpora a indutância planejada, os capacitância equivalente das sondas e os valores de capacitância do próprio circuito integrado³.

³ O valor de capacitância de entrada do circuito integrado MC1648P é de 6 pF como consta no catálogo de dados

Figura 10 – Circuito esquemático de exemplo de um Oscilador Controlado por Tensão.



Fonte: Elaborada pelo autor.

$$f_{VCO} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{sondas} + C_{CI})}}, \quad (3.1)$$

em que C_{sondas} e C_{CI} os valores de capacitância da sonda enterrada ao solo e capacitância de entrada do circuito integrado MC1648P, respectivamente.

3.2.0.2.2 Divisor de frequência

Tendo diversas partes importantes na confecção do circuito, o circuito integrado responsável pela divisão de frequência mostra-se essencial diante do fato de que microcontroladores podem apresentar limitação de largura de banda. O microcontrolador utilizado como parte do desenvolvimento é o ATmega328P e sua frequência de aquisição nos pinos de entrada não pode captar níveis de sinais em 50 MHz, uma vez que sua frequência máxima permitida na entrada é de 16 MHz (CORPORATION, 2015).

Um *prescaler* é um componente utilizado em eletrônica e engenharia de comunicações para reduzir a frequência dos pulsos em um sinal de entrada. Ele realiza uma operação de divisão na frequência de entrada e produz uma saída com frequência reduzida (RAZAVI, 2012).

No projeto, foi utilizado o *prescaler* de modelo MB504LV por possibilitar dividir a frequência de saída do VCO por até 65 vezes, com esse circuito integrado. Isso faz com que frequências de 50 MHz cheguem a 770 KHz e frequências próximas a 250 MHz até 4 MHz. Sendo esses intervalos 770 kHz a 4 MHz passíveis de aquisição pelo microcontrolador. Dessa forma, a equação (3.2) relaciona a frequência de saída do divisor com o frequência gerada pelo VCO.

$$f_{VCO} = 65 \times f_{prescaler}. \quad (3.2)$$

Como complemento para divisão de sinal, caso necessário, pode ainda ser utilizado outro divisor. No circuito final, foi colocado como opção de implementação um contador binário de 4 bits, conhecido pelo C.I. 74HC393. Ao utilizar como sinal de entrada de relógio (em inglês, *clock*) a tensão de saída do amplificador, comentado na próxima subseção, é possível escolher um fator de divisão ainda maior.

3.2.0.2.3 Amplificador

Ao empregar o *prescaler* e analisar suas especificações na folha de dados, é evidente que os níveis de tensão de saída permanecem estáveis, situando-se em uma faixa estreita de 1 V pico a pico (V_{p-p}). Ao observar a tensão nos pinos do microcontrolador ATmega, para ser considerada uma tensão de nível lógico alto, é necessário atingir aproximadamente 90% da tensão de entrada no microcontrolador. Considerando uma tensão de 5 V, esse valor fica em torno de 4,5 V. Por outro lado, para ser considerado um nível lógico baixo, a tensão máxima é de 10% da tensão de entrada, o que equivale a aproximadamente 500 mV.

Uma vez que a saída do *prescaler* alcança no máximo 550 mV na faixa positiva, torna-se necessário amplificar o sinal para que ele não fique em uma região de incerteza entre os níveis lógicos alto e baixo.

Para realizar a amplificação do sinal, foi escolhido o circuito integrado TLV3501AIDR, que é um comparador de alta velocidade com um tempo de resposta de 4.5 ns. Esse comparador viabiliza a aquisição e comparação do sinal de saída do *prescaler*, assegurando que o microcontrolador receba um sinal dentro das faixas requeridas para uma interpretação adequada.

3.2.0.2.4 Circuito final

A análise técnica previu uma mescla de componentes que permitiram um circuito que atendessem ao intervalo de frequências estipulado, acima de 50 MHz.

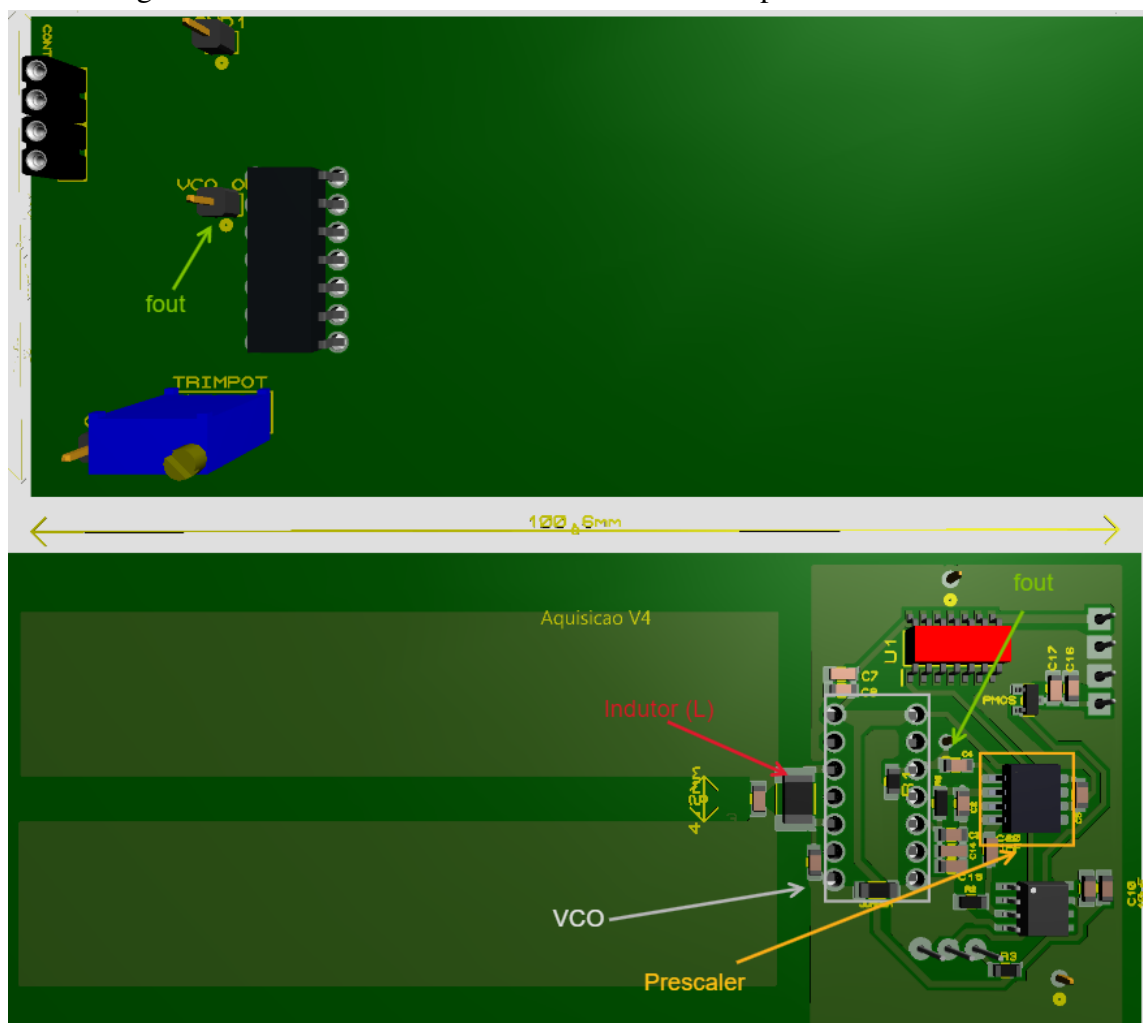
Por fim, foi possível desenvolver o esquemático do circuito transdutor, apresentado no Apêndice C. Além disso, o protótipo final do transdutor pode ser visualizado na Figura 11, enquanto o circuito de controle pode ser visto na Figura 12 e seu respectivo esquemático está disponível no Apêndice A.

Embora tenham sido elaborados os leiautes completos para ambos os circuitos, somente o circuito transdutor foi implementado. Dessa forma, o foco principal deste trabalho concentrou-se no estudo e desenvolvimento do circuito transdutor.

3.3 Calibração dos sensores

A calibração dos sensores foi feita em três passos principais. O primeiro, possibilitar que o Arduino atuasse como medidor de frequência. O segundo, fazer a leitura dos três sensores

Figura 11 – Visão de ambos os lados das sondas capacitivas e o transdutor.



Fonte: Elaborada pelo autor.

a cada minuto. Terceiro, calibrar utilizando o método gravimétrico.

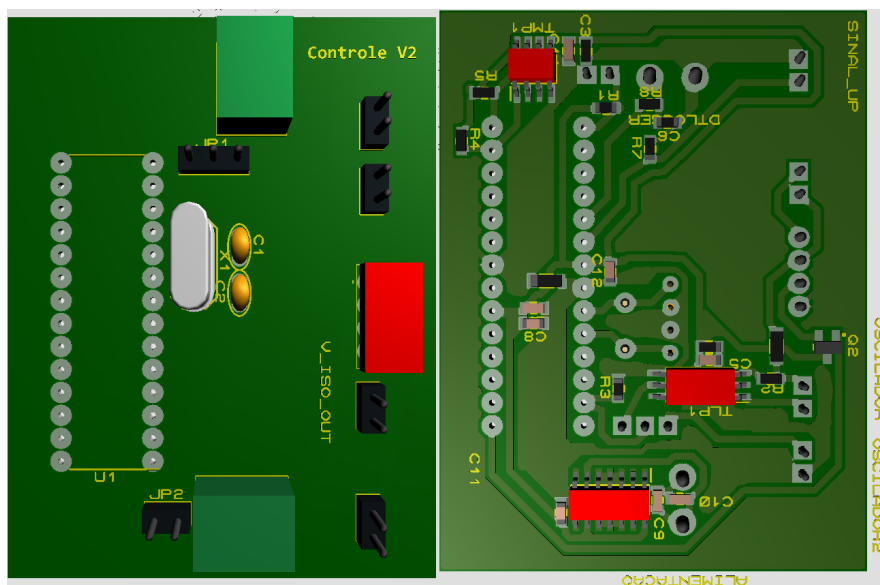
3.3.0.1 Medidas de frequência com Arduino

Ao empregar a plataforma Arduino com a finalidade de aferir a frequência, procedeu-se à aplicação de uma biblioteca denominada FreqCount⁴. A obtenção de resultados devidamente conclusivos demandou a realização de uma calibração, a qual se fundamentou na comparação de valores com os dados adquiridos a partir de um osciloscópio. A validação do processo em questão foi executada mediante a utilização de um gerador de sinais, modelo GF-220 da Instrutherm, empregado como fonte de sinal, e um osciloscópio modelo Tektronix TBS1062, empregado para fins de comparação e análise dos resultados obtidos.

O gerador de sinal foi configurado para emitir uma onda quadrada de 0 a 5 V com uma frequência que foi variada manualmente em passos de 100 kHz. Essa onda foi conectada tanto ao Arduino quanto ao osciloscópio. A programação do Arduino, utilizando a biblioteca

⁴ Repositório da biblioteca no *GitHub*: <https://github.com/PaulStoffregen/FreqCount>

Figura 12 – Visão de ambos os lados da placa de controle em formato 3D.



Fonte: Elaborada pelo autor.

FreqCount, realizou a medição da frequência do sinal gerado. Enquanto o Arduino realizava suas medições, o osciloscópio registrava a frequência da onda gerada em tempo real, sendo os valores anotados em planilha.

Ao estabelecer essa comparação, foi possível avaliar de maneira precisa a concordância entre as medições do Arduino e as medições do osciloscópio. Qualquer discrepância notável entre as leituras poderia indicar possíveis imprecisões na programação do Arduino ou em suas aquisições de dados.

Com base nas medições validadas, foi possível construir uma curva de calibração. Com os dados anotados e curva encontrada, é possível tirar conclusões acerca dos dados e reduzir o erro das medidas.

3.3.0.2 Medidas dos três sensores

O processo de obtenção dos valores medidos dos sensores foi realizado através da plataforma Arduino, utilizando o microcontrolador ATmega328P. A programação foi desenvolvida para permitir a aquisição simultânea das medições provenientes dos três sensores distintos.

Para alcançar os resultados foi empregado outra biblioteca essencial, a biblioteca Arduino-SDI-12⁵.

A segunda biblioteca, Arduino-SDI-12, desempenhou o papel de comunicação e interação com o sensor TEROS 12. Essa biblioteca é projetada especificamente para permitir a conexão e o controle de sensores SDI-12 através do Arduino. Por meio dela, os protocolos de comunicação SDI-12 foram implementados e sincronizados com a programação geral de me-

⁵ Repositório da biblioteca no *GitHub*: <https://github.com/EnviroDIY/Arduino-SDI-12>

da das repostas dos três dispositivos, permitindo a obtenção dos dados de maneira organizada e coerente.

As medidas do sensor 3 foram feitas a partir das portas analógicas do microcontrolador, sendo seu valor convertido para tensão posteriormente na programação.

Esse comportamento programado no Arduino possibilitou que ele atuasse como *data-logger* coletando e apresentando os dados.

3.3.0.3 Calibração dos sensores

Para o processo de calibração dos sensores, foi empregado o método gravimétrico. O solo escolhido para esse experimento foi denominado "Terra Preta Peneirada", mostrada na figura 13, uma mistura que inclui material vegetal e animal, casca de arroz compostado, terra preta, casca de pinus, esterco de frango e barro vermelho. Além disso, é utilizada como substrato para plantas.

A preparação adequada do solo desempenha um papel crucial na obtenção de resultados durante a calibração. Assim, antes de iniciar o procedimento, o solo foi submetido a um processo de secagem ao ar livre durante três dias consecutivos para remover o excesso de umidade que poderia impactar nas medições. Além disso, foram removidos cuidadosamente quaisquer objetos indesejáveis, como pedras, para garantir a homogeneidade da amostra.

Durante o processo de calibração, os dados relevantes foram registrados incluindo o peso da amostra de solo e a quantidade de água adicionada em cada etapa. Essas informações foram documentadas em uma tabela para permitir o monitoramento preciso do procedimento de calibração.

Ao utilizar o método gravimétrico e adotar cuidados específicos na preparação do solo, garantiu-se a obtenção de resultados confiáveis para a calibração dos sensores utilizados no experimento.

Todos os sensores utilizados no presente trabalho (S1, S2 e S3) foram calibrados com base nos passos seguintes:

- Preparo do solo:
 - Secagem da amostra de solo ao ar livre;
 - Pesagem da amostra de solo;
 - Separação da amostra de solo em um recipiente.
- Registro dos dados:
 - Dados de temperatura, a partir do TEROS 12;
 - Dados de frequência (S1), contagens (S2) e tensão (S3);

Figura 13 – Terra utilizada para calibração e medições.



Fonte: Elaborada pelo autor.

- Registro em tabela.
- Tratamento e limpeza dos dados;
- Obtenção de curva de calibração.

A primeira etapa consistiu na secagem do solo por três dias ao ar livre, seguido pela pesagem do solo seco. O peso do solo após essa etapa foi de 8918,5 g e o volume da amostra totalizou 10,5875 cm³, calculado a partir das dimensões do recipiente plástico (11 cm x 27,5 cm x 35 cm). Em seguida, os sensores foram colocados no recipiente, mantendo uma distância aproximada de 10 cm entre eles para evitar possíveis interferências eletromagnéticas. A disposição final dos sensores e do solo pode ser observada na Figura 14.

No próximo passo, os sensores foram retirados do recipiente para adicionar água ao solo. A quantidade de água adicionada ao solo foi de 5% do volume total do solo. Essa mistura foi realizada manualmente, com o objetivo de distribuir uniformemente a água pelo solo. Após a mistura entre água e solo, os sensores foram novamente posicionados no recipiente e seus respectivos valores de resposta foram anotados e registrados em uma tabela. Todos esses procedimentos foram realizados com o cuidado prévio de garantir a homogeneidade do solo. A Figura 15 ilustra o solo após a mistura com a água.

Foi realizado um total de seis repetições desse procedimento, correspondendo a cada um dos valores de VWC. Especificamente, foram feitas oito medições de frequência, de contagens e valor analógico para cada sensor, com um intervalo de 5 segundos entre a aferição dos valores de cada sensor.

Figura 14 – Disposição dos sensores antes da calibração.



Fonte: Elaborada pelo autor.

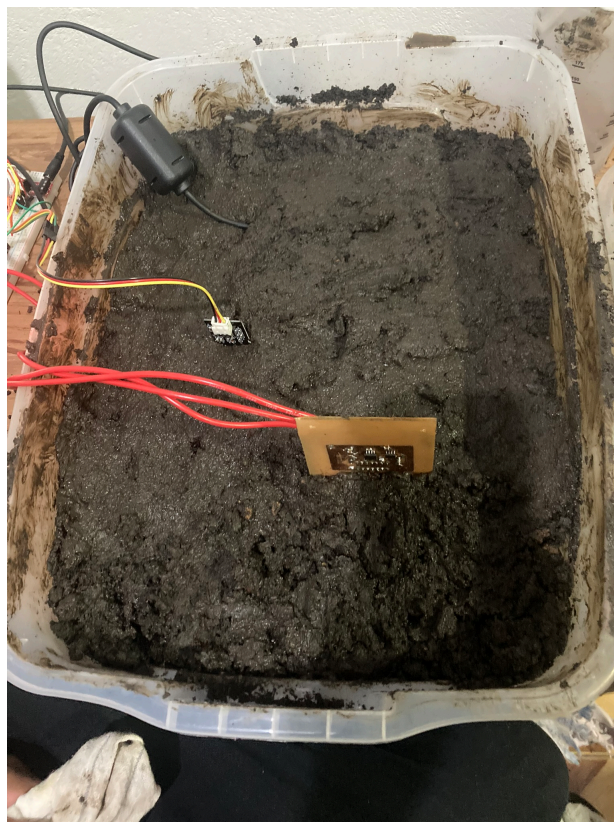
A existência de contadores internos no microcontrolador amplia suas possibilidades de aplicação para diversas finalidades. Ambas as bibliotecas supracitadas também fazem uso desses contadores. Enquanto a biblioteca FreqCount utiliza o contador 1, não é possível utilizar a biblioteca Arduino-SDI-12, pois ela também emprega o mesmo contador, gerando assim uma situação de concorrência. Foram testados diversos intervalos para evitar essa concorrência, e foi definido um intervalo de 5 segundos para evitar conflito na utilização dos recursos.

3.3.1 Experimento prático

Após as curvas obtidas, os códigos foram desenvolvidos utilizando a plataforma Arduino para fazer as medições a cada minuto. Esse processo ocorreu entre as 17h40 do dia 27 de maio e as 23h34 do dia 31 de maio de 2023, tendo sido interrompido no dia 28 de maio, das 10h30 às 12h, para ajuste do sensor S3, dentro de um ambiente coberto, dentro de um quarto iluminado e com presença de brisa. O sensor S3 acabou retornando valores de reposta até o dia 28 às 10:30. Depois desse horário ele não apresentou mais resultado nas leituras e acabou sendo inutilizado. Todos os sensores foram colocados em um mesmo recipiente, como mostra a figura 16.

Foi implementado um método prático de simulação de irrigação utilizando um copo com múltiplas perfurações na parte inferior. Essa abordagem foi adotada como uma representação

Figura 15 – Sensores dentro do recipiente já com a terra úmida.



Fonte: Elaborada pelo autor.

simplificada de um irrigador. Ao encher o copo com água e permitir que ela escoasse através das diversas perfurações o recipiente era irrigado. O recipiente tinha dimensões de 27 cm de diâmetro e 25 cm de altura, enquanto a planta, posicionada bem ao centro, apresentava 24 cm de altura por 30 cm de largura.

Ao final do experimento, os dados coletados foram salvos e utilizados juntamente com as curvas de calibração previamente encontradas. Isso permitiu a síntese dos dados obtidos e a análise do comportamento dos dispositivos durante o experimento.

Figura 16 – Sensores dentro do recipiente de medição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Nesta seção serão abordados os resultados obtidos a partir do processo desenvolvimento da placa com circuito transdutor e as sondas capacitivas, calibração dos dispositivos e experimento prático realizado.

4.1 Circuito transdutor

Para a elaboração da placa foram utilizados além da placa FR-4, o percloroeto de ferro para o processo de corrosão da placa. O circuito pronto para impressão pode ser visto no Apêndice C.

Inicialmente, realizou-se a soldagem dos cabos de alimentação do circuito. Em seguida, procedeu-se à soldagem dos componentes do circuito de oscilação, que incluem o VCO e o indutor (L). Após essa etapa, o circuito foi alimentado com uma fonte de tensão de modelo FA-3005 da Intrutherm, fornecendo ao circuito uma tensão elétrica contínua de 5 V.

Utilizou-se o osciloscópio para auxiliar na análise das frequências presentes no circuito. No entanto, é relevante mencionar que esse osciloscópio possuía uma frequência máxima de amostragem limitada a 60 MHz. Como o VCO gerava um sinal elétrico de saída na faixa das dezenas de mega-hertz, a limitação do osciloscópio impediu a medição direta dessa frequência.

Para contornar esse problema, o componente *prescaler*, modelo MB504LV, foi soldado ao circuito, resultando em uma divisão de frequência¹. Isso permitiu monitorar a frequência de saída do VCO a partir da frequência de saída do *prescaler*. O aparato de testes é ilustrado na Figura 17.

Com os valores de frequência, foi possível obter os valores de capacitância equivalente ao ar livre. O valor de frequência observado foi de aproximadamente 2,5 MHz. Ao aplicar a equação (3.1), pode-se definir o valor aproximado de capacitância das sondas:

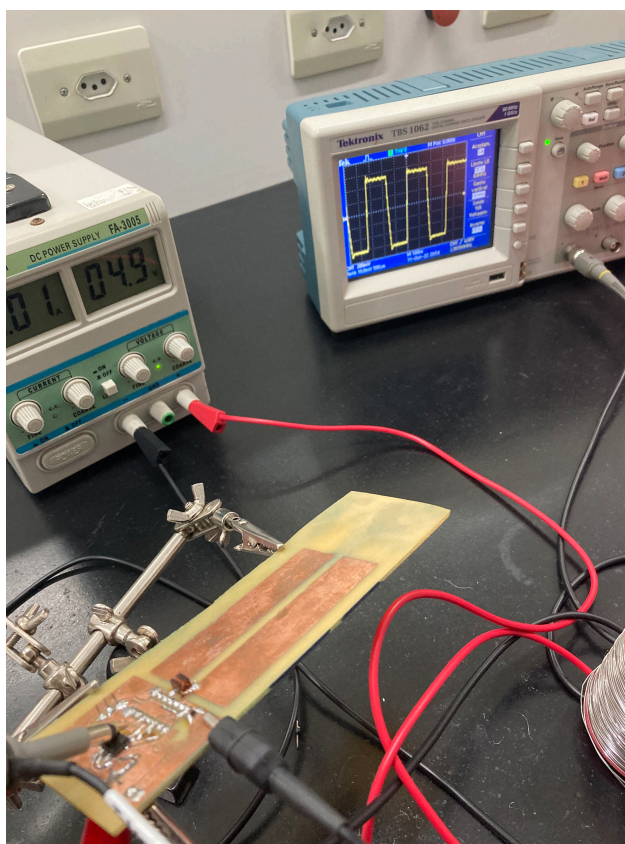
$$f_{vco} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_{sonda} + 6pF)}}$$
$$f_{vco} = f_{prescaler} \times 65 = 2,5 \times 10^6 \times 65 = 162,5 \text{ MHz}$$
$$\Rightarrow C_{sonda} \approx 8,10 \text{ pF}$$

Enquanto a tensão de saída foi 1,1 V pico a pico, a mesma citada no catálogo de dados técnicos do componente.

Ao expor diferentes materiais em frente as sondas capacitivas foi possível observar a variação de frequência na porta de saída do *prescaler*.

¹ O sinal dividido encontra-se no pino 4 (PSCL OUT) no Apêndice C.

Figura 17 – Aparato de medição com o canal 1 do osciloscópio conectado ao sinal de saída do sensor projetado.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2 Calibração dos sensores

Os dados coletados no processo de calibração foram sumarizados e organizados em tabelas, proporcionando uma visualização geral do procedimento. As tabelas 2, 3 e 4 exibem os valores de resposta às variações do VWC para os sensores 1, 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 – Medidas de VWC e resposta em frequência do protótipo (S1).

VWC (%)	M1 (Hz)	M2 (Hz)	M3 (Hz)	M4 (Hz)	M5 (Hz)	M6 (Hz)	M7 (Hz)	M8 (Hz)	Média (Hz)	Desvio Padrão (σ)
Ar livre	2854676	2856998	2870222	2854502	2846454	2874258	2902243	2866564	2865739,625	16289,834
0	2070520	2071576	2071455	2072189	2070676	2071240	2071967	2071678	2071412,625	545,228
5	1966470	1967454	1966567	1966740	1966903	1966928	1966424	1966563	1966756,125	316,946
10	1701379	1701313	1700399	1699426	1698262	1704241	1704403	1704723	1701768,25	2285,839
15	870810	858939	865323	871925	888456	897422	902271	900563	881963,625	16092,155
20	396355	396416	396403	396393	396338	396345	396343	396311	396363	34,325
25	345638	338420	338544	338146	336391	336211	335704	335536	338073,75	3080,614

O processo de tratamento de dados das medições envolveu, essencialmente, encontrar matematicamente a curva que melhor se ajustasse ao conjunto de dados. Em outras palavras, procurou-se identificar a curva que mais adequadamente descrevesse o comportamento do sensor, minimizando erros e mantendo uma correlação significativa dos dados.

Ao analisar o conjunto de dados, identificou-se a presença de uma relação de natureza

Tabela 3 – Medidas de quantidade volumétrica de água do solo em contagens do sensor comercial TEROS12 (S2)

VWC (%)	M1 (Hz)	M2 (Hz)	M3 (Hz)	M4 (Hz)	M5 (Hz)	M6 (Hz)	M7 (Hz)	M8 (Hz)	Média (Hz)	Desvio Padrão (σ)
Ar livre	1784,4202	1782,8401	1784,5402	1782,4601	1783,2401	1782,8501	1782,8601	1784,4302	1783,455138	0,8057764127
0	2113	2113	2165,88	2165,82	2165,61	2113	2114	2115	2133,16	25,26475794
5	2243,85	2243,48	2243,82	2242,92	2242,63	2243,35	2242,9	2243,1	2243,26	0,4161978218
10	2855	2854,6	2854,3	2853,5	2852,2	2851,6	2851	2847,5	2852,46	2,319444371
15	3038,5	3038,8	3039,2	3037,2	3038,5	3036,9	3036,5	3036,9	3037,81	0,975240355
20	3073,8	3074,1	3071,78	3073,9	3074,2	3073,5	3074,1	3072,6	3073,50	0,8084205279
25	3089,4	3089,7	3090,3	3091,4	3090,4	3090,8	3090,7	3090,6	3090,41	0,5904182839

Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 4 – Medidas de quantidade volumétrica de água do solo em tensão do sensor Soil Moisture Sensor v1.2 (S3).

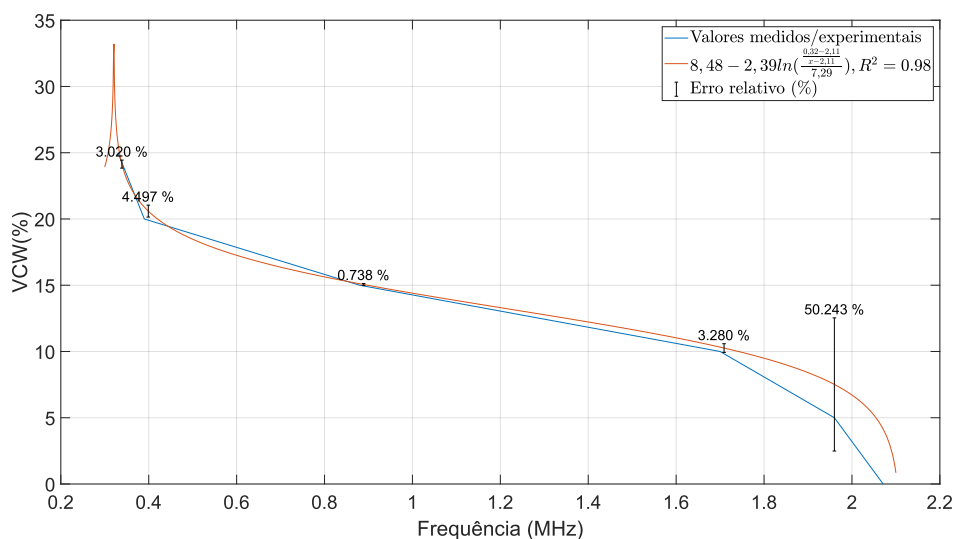
VWC (%)	M1 (Hz)	M2 (Hz)	M3 (Hz)	M4 (Hz)	M5 (Hz)	M6 (Hz)	M7 (Hz)	M8 (Hz)	Média (Hz)	Desvio Padrão (σ)
Ar livre	568	568	572	574	576	578	581	580	574,625	4,715334028
0	492	492	493	492	492	492	492	492	492,13	0,3307189139
5	420	420	420	420	420	420	420	420	420	0
10	340	340	341	340	341	341	342	342	340,88	0,7806247498
15	306	306	306	306	306	306	306	306	306	0
25	301	300	300	301	300	300	301	300	300,375	0,4841229183

Fonte: Elaborada pelo autor.

não linear. Inicialmente, buscou-se abordar esse fenômeno através da aplicação de segmentos de linearidade em todo o intervalo. Contudo, ao realizar uma análise mais aprofundada do modelo, uma curva de natureza não linear foi encontrada como a representação mais adequada para descrever a relação entre as variáveis. Essa curva revelou-se tão abrangente em sua capacidade explicativa que praticamente englobou todas as nuances e padrões do modelo.

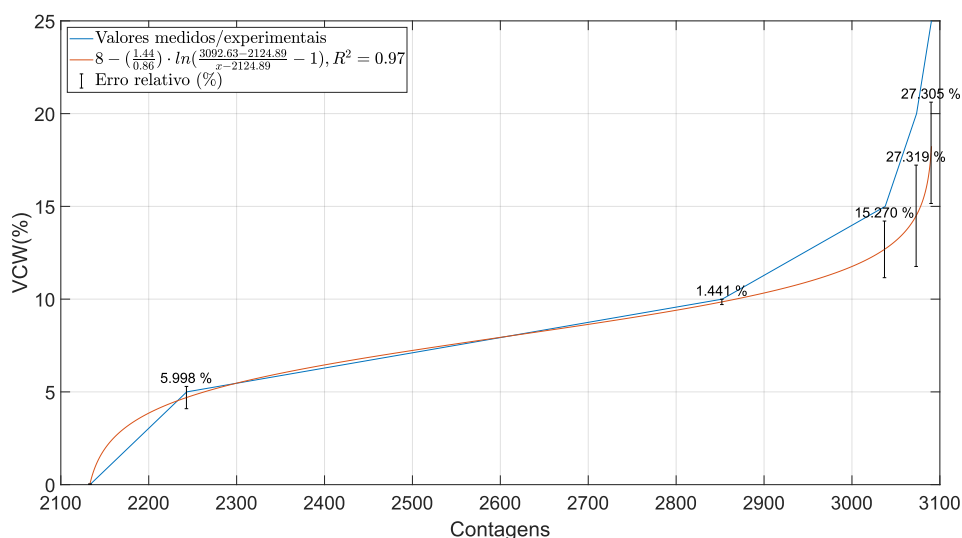
Ao fim do processo, a curva foi construída com base em um modelo de Sigmoide inversa. Onde, com ajuda de softwares computacionais como Scilab, por exemplo, foram geradas as curvas das figuras 18, 19, 20.

Figura 18 – Curva com valores medidos e curva de calibração do sensor 1.



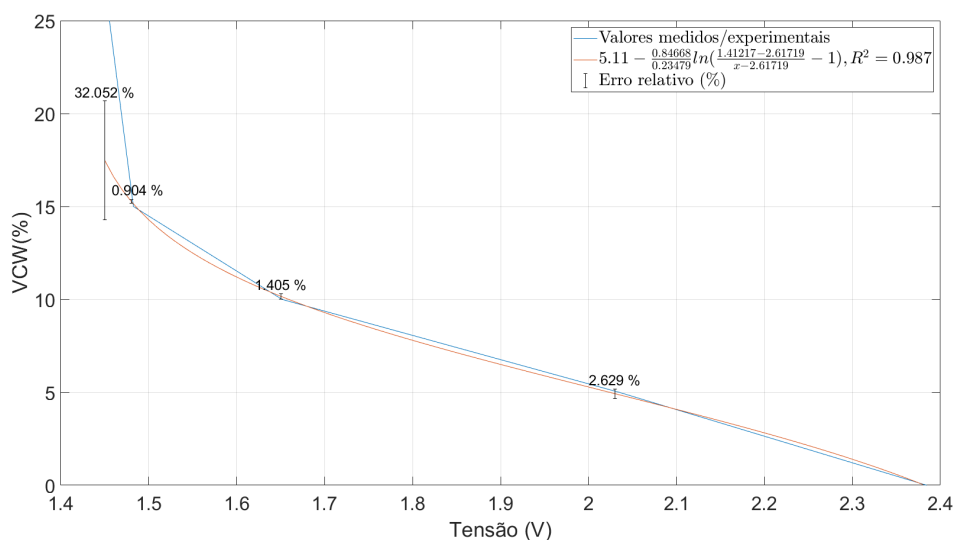
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 19 – Curva com valores medidos e curva de calibração do sensor 2.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 20 – Curva com valores medidos e curva de calibração do sensor 3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na curva do dispositivo S1, apresentada na figura 18, observa-se um comportamento semelhante ao de uma sigmoide inversa, em que os valores no eixo horizontal correspondem à frequência, enquanto os valores no eixo vertical correspondem à variação do VWC da amostra de calibração. Ao examinar o intervalo inicial de VWC, entre 10 e 25%, a curva apresentou valores de erro relativo de no máximo 4,497%. Acima dessa frequência, os valores de erro relativo foram maiores que 50%, cerca de 10 vezes mais altos do que o intervalo anterior. Portanto, se a aplicação requer um erro relativo de até 10%, é possível trabalhar com amostras no intervalo de VWC entre 25 e 10%.

A curva de calibração do sensor S2, conforme ilustrada na figura 19, apresentou valores

de erro relativo de até 6% no intervalo entre 0 a 10% de VWC. Acima desses valores, o erro relativo chegou a até 27,319%, aproximadamente 4,5 vezes maior que o intervalo anterior. Em outras palavras, ao considerar um erro máximo de até 10%, é viável trabalhar com o VWC da amostra entre 0 e 10%.

Já para o sensor S3, como demonstrado na figura 20, os valores de erro relativo obtidos no intervalo entre 0 a 15% de VWC foram de até 2,269%. No entanto, para o intervalo entre 0 e 25% de VWC, o erro chegou a até 32,052%, aproximadamente 15 vezes maior que o intervalo anterior. Considerando um erro relativo máximo de 10%, o intervalo entre 0 e 15% é o mais adequado.

Ainda que as três curvas comentadas anteriormente tenham intervalos de erro relativo 10, 4,5 ou 15 vezes maior, as curvas podem ter seus coeficientes ajustados permitindo intervalos com erro relativo menor. Em termos de valores de correlação (R^2), os sensores S1, S2 e S3, obtiveram 0,98, 0,97 e 0,98, respectivamente, mostrando uma boa correção dos dados brutos dos sensores com porcentagem do conteúdo volumétrico medido.

Em seguida foi realizado o processo de medição e comparação dos três sensores em experimento prático.

4.2.1 Efeito da temperatura nos sensores

Com o objetivo de compreender se a temperatura afetou os três sensores durante o experimento, foram identificadas e analisadas curvas de dispersão dos dados.

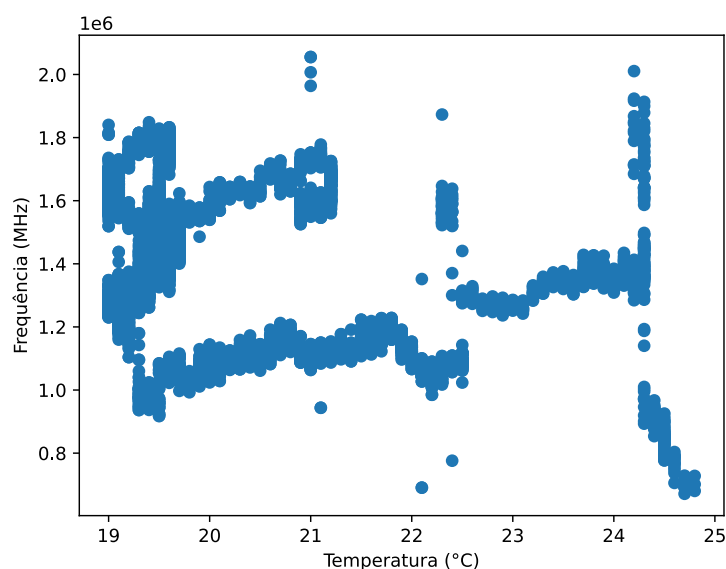
No caso do primeiro sensor, é possível observar o gráfico de dispersão na figura 21. Ao calcular o coeficiente de correlação, obtém-se o valor de -0,28, indicando uma correlação fraca entre a temperatura e a frequência. Em outras palavras, não há evidência direta que a temperatura teve impacto na resposta do protótipo.

Por outro lado, o sensor TEROS 12 também apresentou uma correlação baixa, com um valor de -0,65. Esse resultado não deixa evidente se há uma tendência de degradação no comportamento em relação a resposta das contagens do sensor. A figura 22 exibe o gráfico de dispersão dos dados de contagem em relação à temperatura.

Enquanto o sensor S3, o valor de correlação foi de 0,72. Esse valor indica uma correlação alta entre os dados brutos do sensor S3 e a temperatura. O gráfico de dispersão é ilustrado na figura 23, mostrando um padrão menos disperso em comparação com os gráficos dos dispositivos S1 e S2.

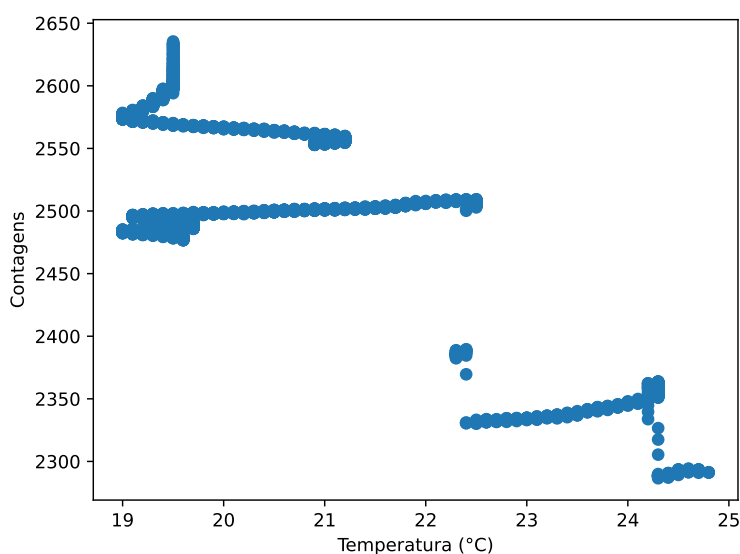
Em outras palavras, a aplicação do sensor S3 em um ambiente com maior variação de temperatura pode ser significativamente influenciada, visto que os resultados demonstram uma tendência de degradação das respostas quando exposto a temperaturas elevadas. Por outro lado, os dispositivos S1 e S2 mostram pouca degradação em suas respostas à variação do VWC. Ambos parecem exibir um comportamento robusto.

Figura 21 – Gráfico de dispersão de frequência em relação à temperatura do sensor S1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 22 – Gráfico de dispersão de contagens em relação à temperatura do sensor S2.



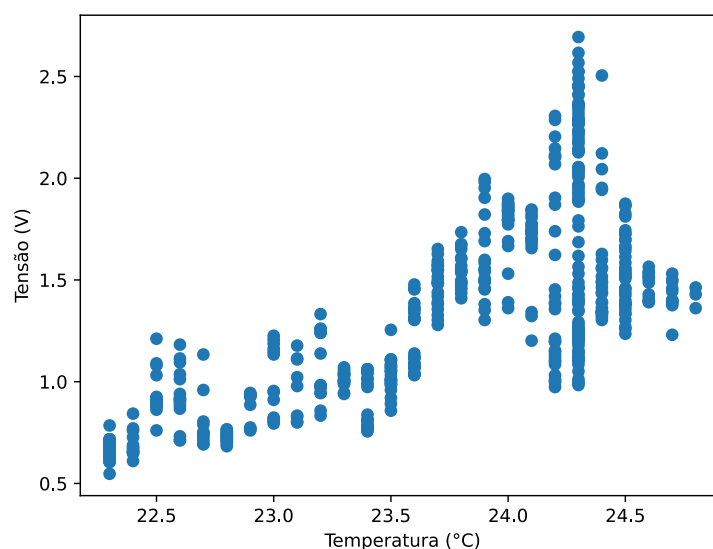
Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Resposta dos sensores à variação de água no solo

Durante o experimento prático, os sensores foram submetidos a três eventos de irrigação a fim de examinar a resposta ao conteúdo volumétrico do solo. Os eventos ocorreram nos dias 27, às 20h30, 28, às 9h30, e 30 de maio, às 21h00. O período do experimento foi do dia 27 de maio às 17h39 com duração até o dia 31 de maio, às 23h34.

Ao coletar os dados brutos dos sensores, foi possível aplicar as curvas de calibração

Figura 23 – Gráfico de dispersão de tensão em relação à temperatura do sensor S3.



Fonte: Elaborada pelo autor.

previamente concebidas para representar os dados em gráfico e relacionar os pontos com os eventos comentados anteriormente.

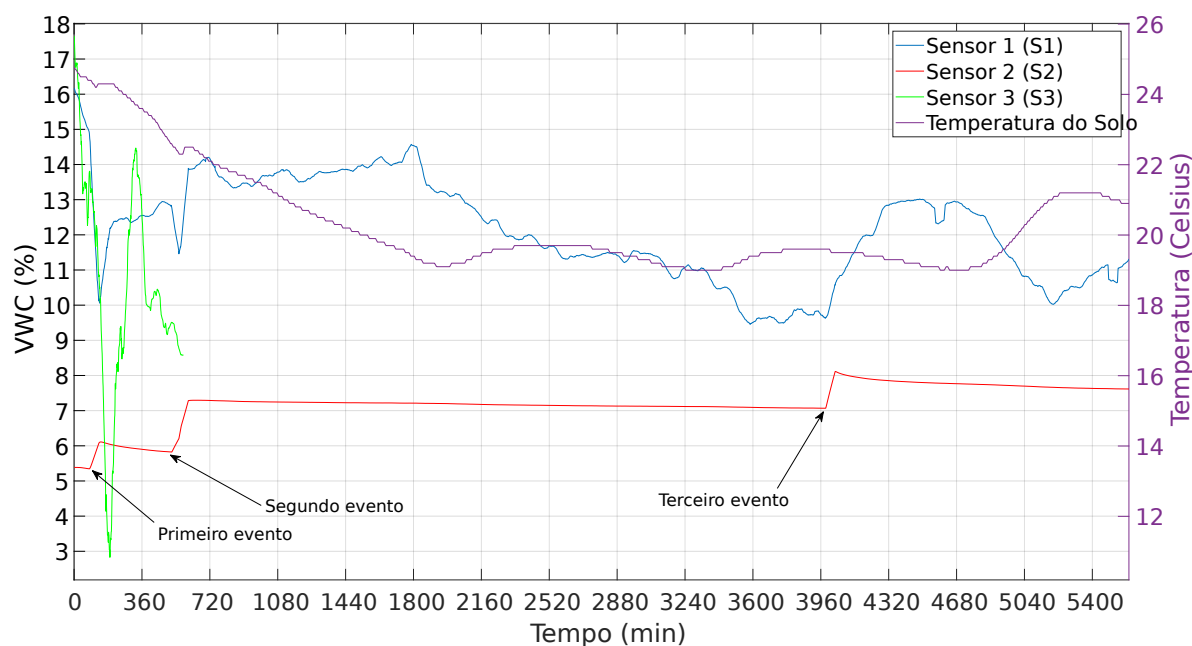
Na figura 24, é possível observar curvas de variação do conteúdo volumétrico de água do solo por minuto de experimento dos três dispositivos, sendo a terceira, sensor 3, presente até o segundo evento, quando o sensor não retornou mais valores de medição. Além disso, dados de temperatura também estão presentes na figura.

O gráfico e seus períodos serão explicados detalhadamente durante esta seção.

A análise do comportamento dos sensores, com relação ao conteúdo volumétrico de água, foi dividida em quatro períodos e está apresentado no texto que segue. O primeiro período consiste no início do experimento até o segundo evento, o segundo período foi do segundo evento até o terceiro evento, enquanto o terceiro período é do terceiro evento de irrigação até o fim do experimento. Além disso, os gráficos são apresentados em relação aos dados brutos e à variação do VWC da amostra no experimento prático.

Os dados apresentados na Figura 25 representam o comportamento dos sensores durante o primeiro período do experimento, sem terem passado pelo processo de calibração. Por outro lado, a Figura 26 mostra os dados de medição após terem sido submetidos à curva de calibração correspondente a cada sensor. Ao analisar os gráficos, os dados dos sensores demonstram padrões característicos que evidenciam os eventos durante sua ocorrência. Durante a preparação dos sensores, eles foram colocados na amostra de forma a estarem em contato direto com o solo, especificamente por meio de suas sondas, responsáveis por medir a variação do conteúdo volumétrico de água.

Figura 24 – Curvas a partir dos dados coletados durante os dias 28 e 31 de maio de 2023.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nos primeiros 120 minutos do experimento, não houve evento de irrigação. No entanto, na curva do sensor 1, é perceptível um aumento na frequência a partir do primeiro minuto do experimento até o primeiro evento de irrigação. Especificamente, o sensor 1 registrou uma frequência máxima de 2,055 MHz e uma frequência mínima de 0,671 MHz.

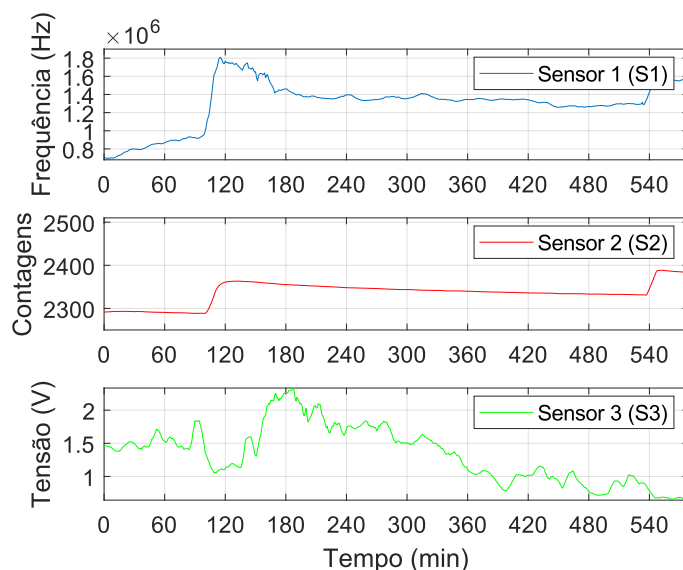
Ao considerar as equações (2.5) e (3.1), bem como a tabela 1, é possível perceber que uma redução no conteúdo volumétrico resulta em uma diminuição da permissividade relativa do solo e, por conseguinte, da capacitância proporcional. Como consequência direta, a frequência, que é inversamente proporcional à capacitância, aumenta. Em outras palavras, a frequência e a permissividade relativa do solo são inversamente proporcionais.

Para o sensor S2 as leituras diminuiram durante o mesmo intervalo, indicando uma queda no VWC na amostra. Os valores máximos e mínimos registrados pelo sensor foram 2635,4 e 2286,58 contagens, respectivamente. Isso demonstra que os dados do sensor são proporcionais a permissividade relativa do solo.

No sensor 3, também foi observada uma diminuição na tensão durante esse período, o que indica uma diminuição no VWC. Para o sensor 3, os valores variaram entre um máximo de 2,693 V e um mínimo de 0,547 V. Uma semelhança notável entre o sensor 1 e o sensor 2 é que ambos apresentaram curvas de frequência mais estáveis, enquanto o sensor 3 apresentou flutuações mais significativas nos valores de tensão.

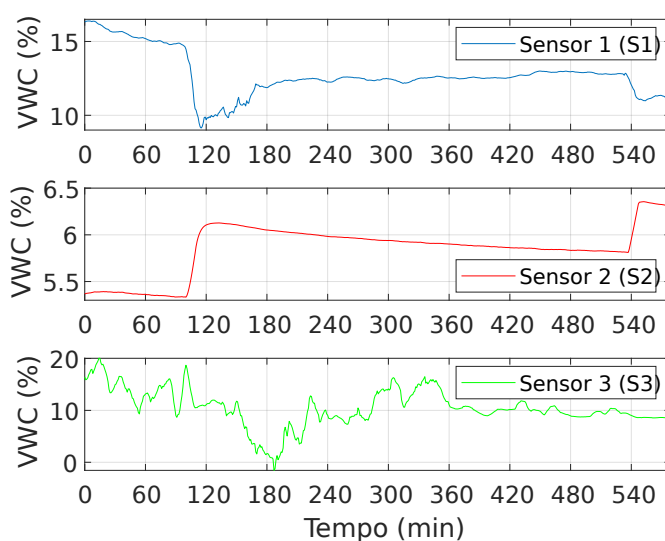
Após o primeiro evento de irrigação, foi observado um aumento inesperado de 1,02 MHz na frequência de resposta do sensor, que passou de 0,9 MHz para 1,92 MHz em 35 minutos.

Figura 25 – Curvas dos dados brutos dos três sensores durante os primeiros 580 minutos, ou primeiro período, de experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 26 – Curvas dos dados a partir das curvas de calibração respectiva de cada um dos três sensores durante os primeiros 580 minutos, ou primeiro período, de experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Essa variação de frequência corresponde a uma taxa de variação de 25,714 kHz por minuto, que por sua vez indica uma variação 0,273% de VWC por minuto.

O mesmo comportamento é visto na resposta de tensão do sensor S3 que teve uma variação de 1,34 V, no intervalo entre 1,35 e 2,69 V, enquanto o intervalo de variação de VWC foi de 10%. Essa alteração da resposta correspondeu a um intervalo de 9,56% de VWC, em um tempo total de 180 minutos com uma taxa de variação de 0,0074 V por minuto ou 0,055% de VWC por minuto.

Entretanto, esse aumento na frequência no dispositivo S1 e diminuição da tensão no sensor S3, indica uma diminuição no valor do VWC da amostra, ou seja, um falso positivo.

Quando observando a curva do sensor S2, foi possível notar um comportamento esperado para um evento de irrigação. Houve um aumento de contagens de 2288 até o pico de 2363 contagens, uma variação de 75 contagens que durou cerca de 50 minutos até o momento de decaimento dos valores. Enquanto seus valores de VWC ficaram entre 5,33% e 6,13%. Isso representa taxa de variação de contagens de 1.5 contagens por minuto, equivalente a 0.02% de VWC por minuto.

Apesar dos falsos positivos observados nos sensores S1 e S3 em resposta ao primeiro evento de irrigação, é importante ressaltar que a taxa de variação em porcentagem do conteúdo volumétrico de água apresentada pelo sensor S1 é significativamente maior do que a dos outros sensores. Enquanto o sensor S2 demonstrou uma taxa de variação de apenas 0,02% de VWC por minuto durante um evento de irrigação, o sensor S1 exibiu uma taxa de variação de 0,273% de VWC por minuto no mesmo contexto. Isso sugere que, apesar dos desafios em filtrar os falsos positivos, o sensor S1 possui uma sensibilidade mais elevada para detectar variações no teor de água do solo.

Ainda que existam discrepâncias entre os dispositivos S1 e S3 em relação ao S2 durante o primeiro evento de irrigação, esse comportamento pode ser atribuído a variáveis como a variação na compactação e a condutividade elétrica do solo.

Quando ocorre um evento de irrigação, o solo pode sofrer compactação, resultando em uma alteração ainda maior no conteúdo volumétrico do solo. Nos sensores capacitivos, que reagem às mudanças na permissividade relativa, a presença de ar que anteriormente era detectada pode ser eliminada. Além disso, quando o solo é compactado, a distribuição de água pode se concentrar em outras partes das sondas. Isso resulta em uma modificação na resposta direta do sensor, dando a impressão de que há menos conteúdo volumétrico do que antes.

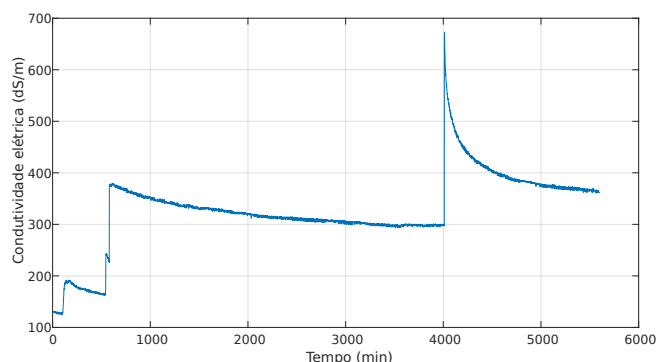
O aumento da concentração de sais também pode levar a um aumento na frequência do sinal gerado pelo sensor mesmo com um aumento no VWC. Uma vez que os sais podem aumentar a condutividade elétrica do solo, a resposta capacitiva do sensor é afetada. Na curva ilustrada na Figura 27, é possível observar um aumento da condutividade nos momentos de irrigação.

A figura também apresenta a alteração da condutividade elétrica nos outros eventos de irrigação ao longo do experimento prático.

Com o objetivo de avaliar o comportamento da correlação entre a Condutividade Elétrica do solo e a resposta do dispositivo S1, analisou-se o gráfico de dispersão da frequência em relação à EC, o qual é ilustrado na figura 28.

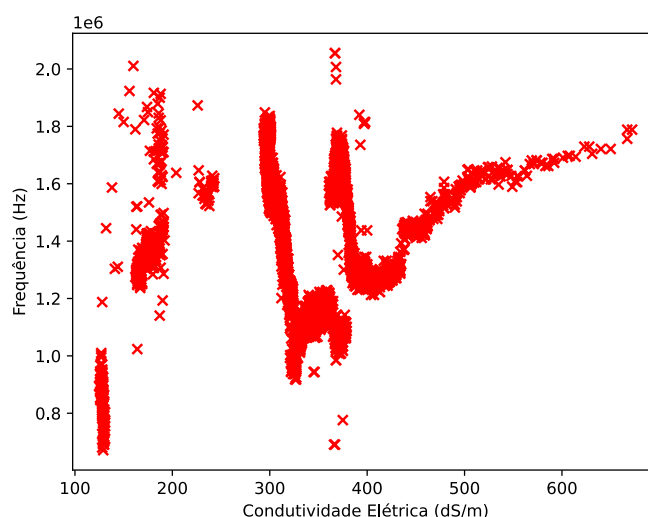
É possível notar que os dados aparecem dispersos, de modo que o coeficiente de correlação resultante foi de 0,055. O dispositivo S3 apresentou uma coeficiente de -0,14. O que

Figura 27 – Curva de condutividade elétrica do solo medida pelo sensor TEROS 12 durante o experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 28 – Gráfico de dispersão da frequência em relação à condutividade elétrica do sensor S1.



Fonte: Elaborada pelo autor.

sugere fraca influência da condutividade elétrica na resposta do sensor. Entretanto, o TEROS 12 apresentou um valor de 0.96. Que sugere forte influência da condutividade elétrica na resposta do sensor.

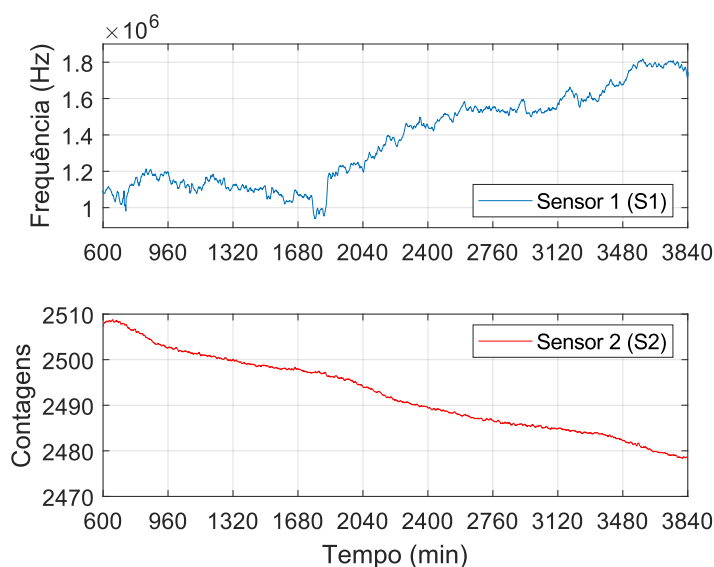
Ainda que o dispositivo S1 tenha uma característica construtiva menos sofisticada que os dispositivos S2 e S3, ele exibe um comportamento robusto em relação da condutividade elétrica. No entanto, para confirmar isso, é necessário realizar mais medições. A pensar do sensor S2 ter uma alta correlação das contagens com a condutividade, ele não apresentou falsos positivos nos momentos de irrigação.

Após o primeiro evento de irrigação, o protótipo desenvolvido demonstrou um comportamento decrescente e constante em relação ao conteúdo volumétrico de água no solo, ao passo que os outros sensores apresentaram uma queda mais acentuada até o segundo evento

de irrigação. Essas discrepâncias de comportamento podem estar associadas a fatores como a sensibilidade do circuito transdutor, a calibração inicial dos sensores e até mesmo variações na distribuição de água no solo.

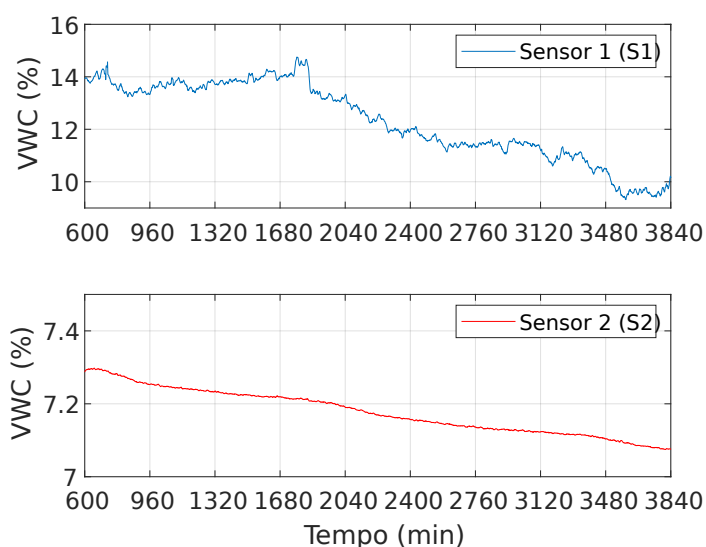
As curvas apresentadas nas Figuras 29 e 30 mostram, no segundo período de experimento, os dados brutos dos sensores e os dados após a aplicação da calibração, respectivamente.

Figura 29 – Curvas dos dados brutos dos dois sensores durante o segundo período de experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 30 – Curvas dos dados após o processo de calibração respectiva de cada um dos dois sensores durante o segundo período de experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar os dados brutos do sensor, figura 29, pode-se observar que eles se comportaram conforme o esperado, uma vez que não ocorreram eventos de irrigação ao longo de todo

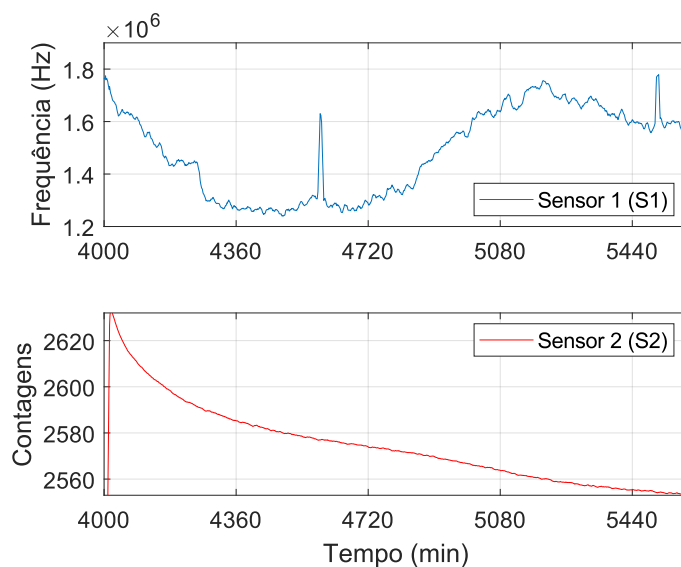
o segundo período do experimento. Durante esse intervalo de tempo, houve uma diminuição contínua do conteúdo volumétrico do solo apresentando curvas de comportamento decrescente.

Para a curva de VWC, figura 30, do protótipo houve uma queda de VWC de 4% durante o segundo período de experimento, enquanto para o dispositivo S2 a variação foi de 0,22%. Ambos apresentam uma taxa de variação do conteúdo volumétrico de 0,0012% e 0,0000679% por minuto, respectivamente. Essa variação sugere que a água possa ter se movimentado pelos poros do solo, possivelmente sendo absorvida pelas raízes das plantas ou evaporada.

Esses resultados sugerem que as condições do solo, como a ausência de irrigação e, conseqüentemente, a variação do conteúdo volumétrico de água, contribuem para um comportamento previsível dos sensores ao longo do segundo período de experimento. Além disso, a resposta do protótipo demonstrou novamente uma sensibilidade maior em relação ao VWC do solo.

O terceiro período do experimento é ilustrado nas figuras 31 e 32.

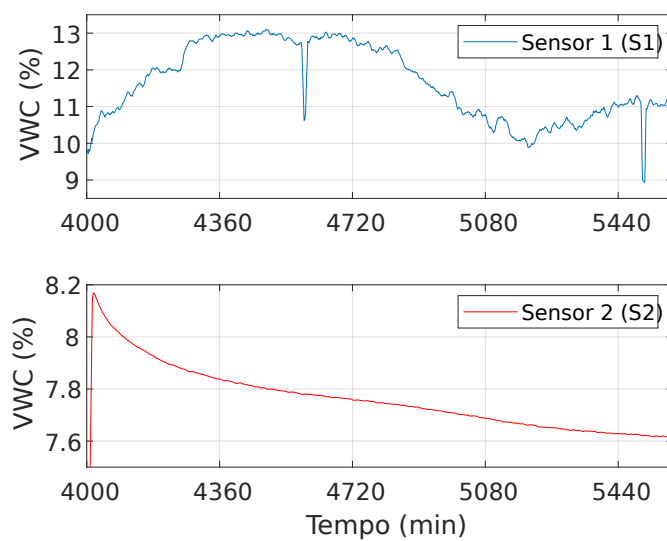
Figura 31 – Curvas dos dados brutos dos dois sensores durante o terceiro período de experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após cerca de 66 horas de experimento, ocorreu mais um evento de irrigação. Mais uma vez, o comportamento de falso positivo se manifestou na resposta do protótipo, resultando em uma diminuição na frequência. No entanto, o tempo de resposta à variação do VWC até a estabilização foi de aproximadamente 360 minutos para o protótipo. Ou seja, uma taxa de variação de 0.008% de VWC, menor que àquelas apresentadas anteriormente. Esse comportamento pode estar relacionado à estrutura do solo e ao movimento hidrológico. Uma vez que a água demora mais para fluir pelos poros, as placas capacitivas levam mais tempo para receber a água devido a esse movimento mais lento. Isso mostra que o dispositivo S1 tende a ter mais

Figura 32 – Curvas dos dados após o processo de calibração respectiva de cada um dos dois sensores durante o terceiro período de experimento.



Fonte: Elaborada pelo autor.

influência às alterações estruturais do solo do que os TEROS 12.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi desenvolvido um transdutor capacitivo em altas frequências capaz de detectar o conteúdo volumétrico de água no solo. Esse dispositivo foi comparado com outros dois sensores, a fim de avaliar sua viabilidade como substituto no manejo do cultivo de hortaliças.

A partir da análise dos dados coletados, foi possível estabelecer uma curva de calibração para os três dispositivos, permitindo a determinação do conteúdo volumétrico de água no solo. Através dos ajustes dos coeficientes durante o processo de calibração, é possível corrigir discrepâncias iniciais e obter uma correspondência mais precisa entre os valores medidos pelo sensor e os valores reais de VWC. O ajuste desses coeficientes proporciona versatilidade ao dispositivo, uma vez que a curva de calibração pode ser adaptada de acordo com o intervalo de detecção do conteúdo volumétrico da amostra com a qual se está trabalhando.

Após obter as curvas de calibração, o sensor permaneceu em funcionamento durante um período de 4 dias coletando dados por meio de um sistema de aquisição de dados utilizando a plataforma Arduino, ao longo do experimento a relação entre o conteúdo volumétrico de água e a variável de medida de cada equipamento foi verificada, mantendo a consistência dentro do escopo do estudo.

Em relação à construção do protótipo transdutor, é recomendável considerar a utilização de um invólucro que evite a deterioração dos componentes do circuito de aquisição e das sondas, garantindo assim a durabilidade e o desempenho do sensor ao longo do tempo.

Afim de otimizar os resultados obtidos, um aspecto que merece atenção diz respeito às discrepâncias identificadas no protótipo após o processo de irrigação, onde os valores de frequência divergiram do padrão esperado. Nesse contexto, uma abordagem possível seria a inserção completa do protótipo no solo, contrastando com a parte externa que permaneceu exposta. Isso poderia potencialmente eliminar interferências decorrentes do contato das sondas com o ar. Explorar essa alternativa oferece a perspectiva de aprimorar significativamente a exatidão das leituras e a compreensão dos dados coletados.

Essas descobertas proporcionam uma base sólida para o uso desse sensor capacitivo em altas frequências como uma ferramenta eficiente no manejo do cultivo de hortaliças, auxiliando na determinação e monitoramento do conteúdo volumétrico de água no solo de forma confiável, uma vez que o agricultor pode utilizar dos dados para tomar decisões com um sensor mais barato. Futuras melhorias no projeto e na construção do protótipo podem contribuir ainda mais para sua aplicabilidade prática e sucesso no campo agrícola.

De fato, se a aplicação em questão prioriza a visualização da queda no conteúdo volumétrico de água do solo e o tempo de resposta não é um fator crítico, as diferenças de resposta no

circuito entre os sensores podem não ser significativas. É interessante observar que, mesmo que as informações entre os sensores não estejam inicialmente em níveis semelhantes de conteúdo volumétrico de água, após a calibração e alguns ajustes nos coeficientes, é possível melhorar as curvas de calibração e alcançar valores mais satisfatórios. Além disso, uma alternativa para o futuro é realizar a calibração do dispositivo em relação ao sensor TERSOS 12 e verificar se há melhorias nas curvas e, conseqüentemente, nos dados obtidos.

Nesses casos, o foco principal é observar a tendência geral de diminuição no VWC ao longo do tempo, independentemente das nuances individuais de cada sensor. Contanto que todos os sensores mostrem a redução esperada no VWC após um evento de irrigação, a aplicação pode ser adequadamente atendida.

É importante ter em mente as necessidades específicas da aplicação e considerar se as diferenças nas respostas dos sensores são relevantes para o objetivo final do estudo. Se a visualização da queda no VWC é o aspecto mais importante, então, como mencionado, as diferenças observadas podem não ter um impacto substancial nos resultados finais.

Para pesquisas futuras, é recomendável investigar a variação de temperatura em ambientes menos controlados e explorar diferentes tipos de solos para analisar sua influência nas respostas dos dispositivos. Além disso, pode-se explorar a correlação entre as respostas dos sensores em relação condutividade elétrica do solo em outros níveis dos observado nesse trabalho, o que pode levar a melhorias nas curvas de calibração ao considerar outras variáveis. Essas abordagens podem contribuir para um maior entendimento do comportamento dos sensores em diferentes condições ambientais e aprimorar sua precisão e confiabilidade.

Observando a correlação entre variáveis estabelecidas e resposta do protótipo de sensor a variações de frequência, representando a variação da quantidade volumétrica de água presente no solo, entende-se que o sensor desenvolvido pode ser utilizado para medir o conteúdo volumétrico do solo e, conseqüentemente, dar auxílio no manejo do cultivo não só das hortaliças.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. Agricultura familiar. **Revista de Política Agrícola**, v. 15, n. 4, 2006. ISSN 2317-224X. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/view/511>. Acesso em: 09 set. 2023.
- ASSIS, R. L. d. et al. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. **Engenharia Agrícola**, Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, v. 29, n. 4, p. 558568, 2009. ISSN 0100-6916. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162009000400006>. Acesso em: 09 set. 2023.
- BAUMHARDT, R. L.; LASCANO, R. J.; EVETT, S. R. Soil material, temperature, and salinity effects on calibration of multisensor capacitance probes. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 1940–1946, 2000. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj2000.6461940x>. Acesso em: 09 set. 2023.
- BORHAN, M. S.; PARSONS, L. R. **MONITORING OF SOIL WATER CONTENT IN A CITRUS GROVE USING CAPACITANCE ECH2O PROBES**. St. Joseph, MI: ASAE, 2004. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=16383&t=5>.
- BOYLESTAD, R. L. **Introductory Circuit Analysis**. Harlow: Pearson Education Limited, 2013. ISBN 978-1-292-02400-4.
- CLEMENTE, F. M. V. T. **Produção de Hortaliças para Agricultura Familiar**. Brasília, DF: Embrapa, 2015. 108 p.
- CORPORATION, A. **8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash**. 2015. Disponível em: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. Acesso em: 09 set. 2023.
- DUNNICLIFF, J. **Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance**. New York: John Wiley Sons, 1993. 109 p. ISBN 978-0-471-00546-9.
- ELLER, H.; DENOTH, A. A capacitive soil moisture sensor. **Journal of Hydrology**, Elsevier BV, v. 185, n. 1-4, p. 137–146, nov. 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)03003-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)03003-4). Acesso em: 09 set. 2023.
- GAO, Z. et al. Design and test of a soil profile moisture sensor based on sensitive soil layers. **Sensors**, MDPI AG, v. 18, n. 5, p. 1648, 2018. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18051648>. Acesso em: 09 set. 2023.
- GONZALEZ-TERUEL, J. et al. Design and calibration of a low-cost sdi-12 soil moisture sensor. **Sensors**, MDPI AG, v. 19, n. 3, p. 491, 2019. ISSN 1424-8220. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/s19030491>.
- GROUP, S.-. **S. SDI-12 Support Group website**. Disponível em: <https://www.sdi-12.org/>. Acesso em: 09 set. 2023.

- HORNERO, G. et al. A novel low-cost smart leaf wetness sensor. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 143, p. 286–292, 2017. ISSN 0168-1699. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169917305197>. Acesso em: 09 set. 2023.
- HUANG, X.; HORN, R.; REN, T. Deformation and pore water pressure change during static and cyclic loading with subsequent shearing on soils with different textures and matric potentials. **Soil and Tillage Research**, Elsevier BV, v. 209, p. 104909, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104909>. Acesso em: 09 set. 2023.
- IAEA. **Field Estimation of Soil Water Content**. Vienna, urlaccessdate = 09 set. 2023.: INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2008. (Training Course Series, 30). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/7801/field-estimation-of-soil-water-content>.
- JAKUS, R. Hacking a capacitive soil moisture sensor (v1.2) for frequency output. Underwater Arduino Data Loggers, 2020. Disponível em: <https://thecavepearlproject.org/2020/10/27/hacking-a-capacitive-soil-moisture-sensor-for-frequency-output/>. Acesso em: 09 set. 2023.
- JCGM. **International Vocabulary of Metrology - Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)**. 2008. ed. Berlin: ISO, 2008.
- JILANI, M. T. A brief review of measuring techniques for characterization of dielectric materials. **International Journal of Information Technology and Electrical Engineering**, 12 2012.
- JUNIOR, R. L. da C.; RODRIGUES, E. O.; ANTAYHUA, R. A. R. Coplanar capacitor probes design for a moisture soil sensor operating at high frequencies. In: **2021 5th International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6. Acesso em: 09 Set. 2023.
- KOJIMA, Y. et al. Low-cost soil moisture profile probe using thin-film capacitors and a capacitive touch sensor. **Sensors**, MDPI AG, v. 16, n. 8, p. 1292, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s16081292>. Acesso em: 09 set. 2023.
- LEVIDOW, L. et al. Improving water-efficient irrigation: Prospects and difficulties of innovative practices. **Agricultural Water Management**, Elsevier BV, v. 146, p. 84–94, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.012>. Acesso em: 09 set. 2023.
- LOUKI, I. I.; AL-OMRAN, A. M. Calibration of soil moisture sensors (ech2o-5te) in hot and saline soils with new empirical equation. **Agronomy**, MDPI AG, v. 13, n. 1, p. 51, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010051>. Acesso em: 09 Set. 2023.
- METER. Teros 12 - umidade, temp. e ce. METER Group, fev. 2022. Disponível em: <https://metergroup.com.br/agraria/produtos/teros12/>. Acesso em: 09 set. 2023.
- MUÑOZ-CARPENA, R. Field devices for monitoring soil water content. **EDIS**, University of Florida George A Smathers Libraries, v. 2004, n. 8, 1969. Disponível em: <https://doi.org/10.32473/edis-ae266-2004>. Acesso em: 09 set. 2023.
- NOBORIO, K. Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier BV, v. 31, n. 3, p. 213–237, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1016%2Fs0168-1699%2800%2900184-8>. Acesso em: 09 set. 2023.

NRCS. Soil quality indicators. Natural Resources Conservation Service (NRCS), 2011. Disponível em: <https://www.nrcs.usda.gov/sites/default/files/2022-10/Soil%20Electrical%20Conductivity.pdf>. Acesso em: 09 set. 2023.

OECD. **Governança dos Recursos Hídricos no Brasil**. [s.n.], 2015. 304 p. Disponível em: <https://www.oecd-ilibrary.org/content/publication/9789264238169-pt>. Acesso em: 09 set. 2023.

OKASHA, A. M. et al. Designing low-cost capacitive-based soil moisture sensor and smart monitoring unit operated by solar cells for greenhouse irrigation management. **Sensors**, v. 21, n. 16, 2021. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/16/5387>. Acesso em: 09 set. 2023.

OR, D.; WRAITH, J. M.; WARRICK, A. Soil water content and water potential relationships. **Soil physics companion**, CRC Press: New York, v. 1, p. 49–84, 2002.

PAZ, V. P. da S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, scielo, v. 4, p. 465–473, 2000. ISSN 1415-4366. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662000000300025&nrm=iso. Acesso em: 09 set. 2023.

PEQUENO, F. d. C. L. Petrus Luiz de L. et al. **Água Disponível do Solo**: Algumas características físicas do solo importantes para quantificação. 2002. Disponível em: <https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br/consulta/busca?b=ad&id=703805&biblioteca=vazio&busca=703805&qFacets=703805&sort=&paginacao=t&paginaAtual=1>. Acesso em: 24 de ago. de 2023.

Pozdnyakova, L. A. **Electrical properties of soils**. Tese (Doutorado) — University of Wyoming, jan. 1999.

Protim Goswami, M.; Montazer, B.; Sarma, U. Design and characterization of a fringing field capacitive soil moisture sensor. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 68, n. 3, p. 913–922, 2019.

RAI, R. K.; SINGH, V. P.; UPADHYAY, A. Soil analysis. In: **Planning and Evaluation of Irrigation Projects**. Elsevier, 2017. p. 505–523. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811748-4.00017-0>. Acesso em: 09 set. 2023.

RAZAVI, B. **RF Microelectronics**. 2. ed. [S.l.]: Prentice Hall, 2012. ISBN 9780137134731.

Rêgo Segundo, A. K. et al. Sensor for measuring electrical parameters of soil based on auto-balancing bridge circuit. In: **2017 IEEE SENSORS**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–3.

Saeed, I. A. et al. Development of a low-cost multi-depth real-time soil moisture sensor using time division multiplexing approach. **IEEE Access**, v. 7, p. 19688–19697, 2019.

SCHLAEGER, S.; HÜBNER, C.; BECKER, R. Simple soil moisture probe for low-cost measurement applications. 2005.

Schubert, M. J. W. et al. Capacitive sensor technology for soil moisture monitoring networks. In: **2017 24th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 190–193.

Shigeta, R. et al. Capacitive-touch-based soil monitoring device with exchangeable sensor probe. In: **2018 IEEE SENSORS**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4.

SILVA, I. de O. **Desenvolvimento de um sensor capacitivo para o monitoramento de umidade do solo**. 86 f. Monografia (Dissertação) — Universidade Federal Do Ceará, Fortaleza, 2005. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/18606>. Acesso em: 09 set. 2023.

SMITH-ROSE, R. L.; APPLETON, E. V. The electrical properties of soil for alternating currents at radio frequencies. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 140, n. 841, p. 359–377, 1933. Disponível em: <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspa.1933.0074>. Acesso em: 23 set. 2023.

TEAM, T. A. **About Arduino**. 2021. Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/about>. Acesso em: 23 set. 2023.

TOMAR, M.; PATIDAR, T. Development of a low cost soil moisture sensor. In: **2019 International Conference on Vision Towards Emerging Trends in Communication and Networking (ViTECoN)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5.

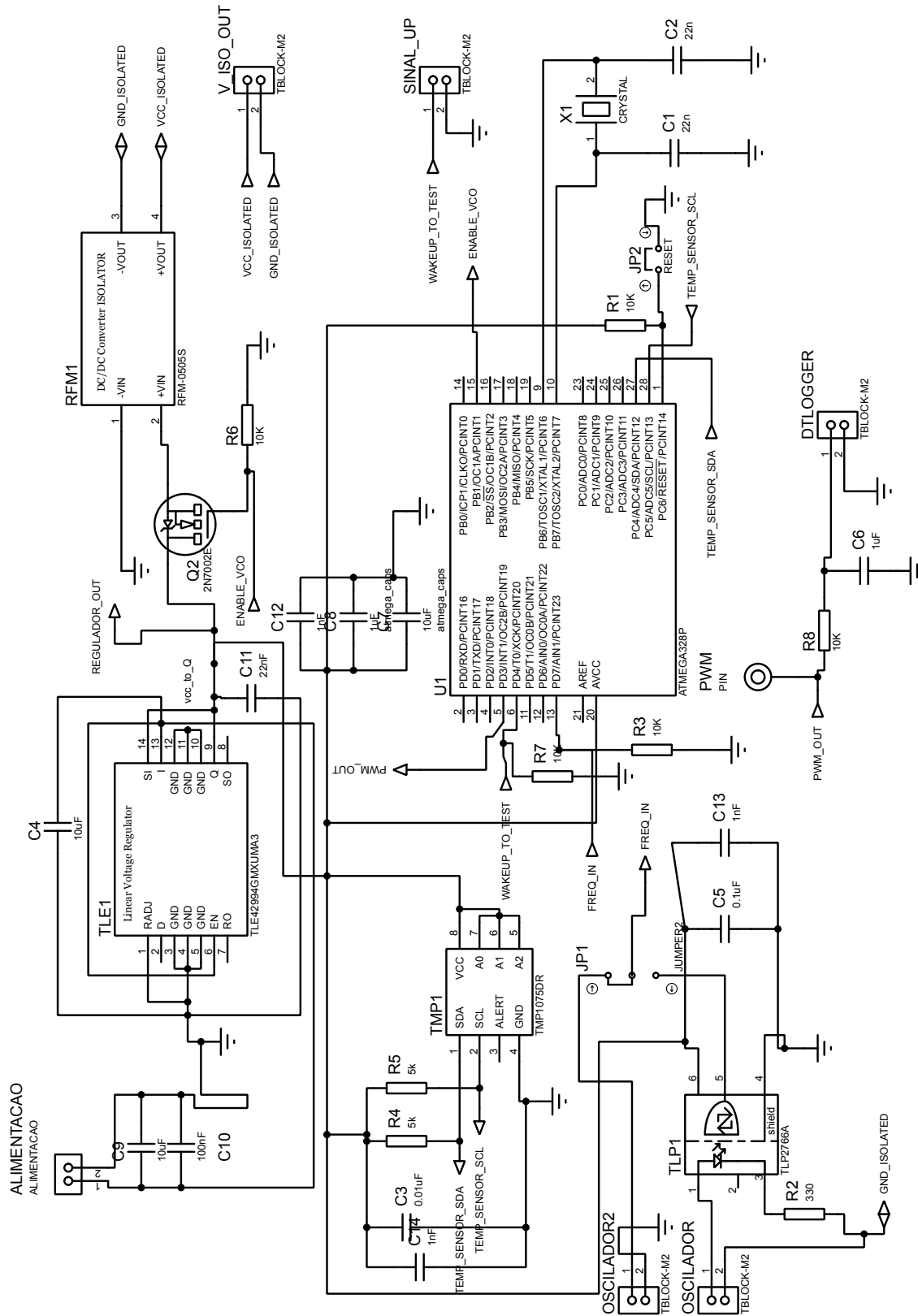
TOPP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. **Water Resources Research**, American Geophysical Union (AGU), v. 16, n. 3, p. 574–582, jun. 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/wr016i003p00574>. Acesso em: 23 set. 2023.

UME. **Soil compaction**. 2018. Disponível em: <https://extension.umn.edu/soil-management-and-health/soil-compaction#soil-structure-1147260>. Acesso em: 23 ago. 2023.

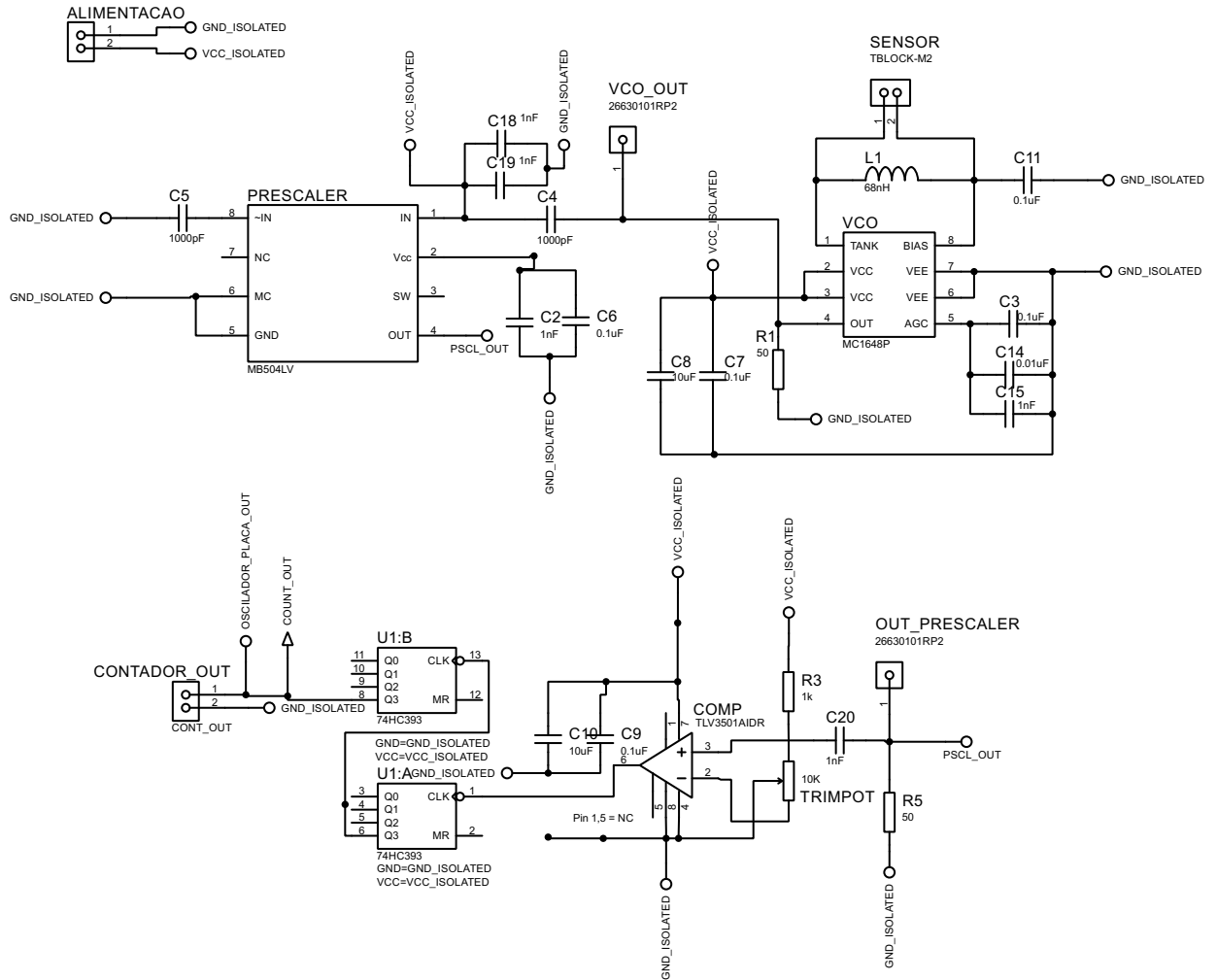
ZAZUETA, J. X. F. S. Soil moisture sensors. Gainesville: University of Florida, 1994. (Bulletin 292).

Apêndices

APÊNDICE A - ESQUEMÁTICO FINAL DO CIRCUITO DE CONTROLE



APÊNDICE B – ESQUEMÁTICO FINAL DO CIRCUITO TRANSDUTOR



**APÊNDICE C – ESQUEMÁTICO CIRCUITO TRANSDUTOR PARA IMPRESSÃO
EM PLACA COBREADA**

