



Trabalho de Conclusão de Curso

Sistema de monitoramento em tempo real do potencial matricial do solo

de Maria Júlia de Oliveira Vieira

orientado por
Prof. Dr. Davi Bibiano

Universidade Federal de Alagoas
Instituto de Computação
Maceió, Alagoas
26 de Julho de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

SISTEMA DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO POTENCIAL MATRICIAL DO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto de Computação da Universidade
Federal de Alagoas como requisito parcial
para a obtenção do grau de Engenheiro de
Computação.

Maria Júlia de Oliveira Vieira

Orientador: Prof. Dr. Davi Bibiano

Banca Avaliadora:

Thiago Cordeiro Prof. Dr., UFAL

Erick Barboza Prof. Dr., UFAL

Maceió, Alagoas
26 de Julho de 2022

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 - 1767

V658s Vieira, Maria Júlia de Oliveira.

Sistema de monitoramento em tempo real do potencial matricial do solo / Maria Júlia de Oliveira Vieira. – 2022.
25 f. : il.

Orientador: Davi Bibiano.

Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia de Computação) - Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Computação. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 24-25.

1. Solos - Potencial matricial - Monitoramento em tempo real. 2. Umidade do solo. I. Título.

CDU: 004:631

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
Instituto de Computação

SISTEMA DE MONITORAMENTO EM TEMPO REAL DO POTENCIAL MATRICIAL DO SOLO

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Computação.

Aprovado em 26 de Julho de 2022:

Documento assinado digitalmente
 DAVI BIBIANO BRITO
Data: 27/07/2022 10:28:09-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Davi Bibiano,
Prof. Dr., Orientador

Documento assinado digitalmente
 Thiago Damasceno Cordeiro
Data: 27/07/2022 09:56:17-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Thiago Cordeiro,
Prof. Dr., UFAL

Documento assinado digitalmente
 ERICK DE ANDRADE BARBOZA
Data: 27/07/2022 10:43:00-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Erick Barboza,
Prof. Dr., UFAL

Dedicatória

Aos meus companheiros de jornada.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer à minha família, a meus pais Eliane e Sérgio por proporcionarem uma educação de qualidade durante toda a minha fase de crescimento. Igualmente aos meus irmãos João Gabriel e João Daniel por terem paciência comigo. Gostaria de agradecer ao meu orientador Prof. Davi Bibiano, pois desde cedo na graduação ofereceu a oportunidade e as ferramentas para trabalhar no tema que eu tinha interesse. Não posso deixar de agradecer também ao corpo docente do Instituto de Computação, em particular o professor Prof. Thiago Cordeiro, que por todos esses anos de graduação esteve me encorajando a seguir em frente, independente de todas as dificuldades. Agradeço também a Marcelo Gusmão pelo seu trabalho na secretaria do IC, porque com a ajuda dele muitas coisas ficaram muito menos burocráticas. E por fim gostaria de agradecer aos meus companheiros do laboratório EASY-SPARC, que foram meu suporte durante esses anos, Andressa Martins, Arthur Vangasse, Bruno Georgevich, Eduardo Miranda, Glauber Leite, Luís Felipe e Roger Almeida, e aos meus muitos amigos, que mesmo não estando por perto ou no mesmo meio acadêmico que eu, sempre me encorajaram e me mantiveram de pé nesse caminho.

26 de Julho de 2022, Maceió - AL

*Com a palavra sempre que começamos e terminamos o dia
Vamos conectar o hoje ao amanhã
Ooh, mesmo que tenhamos parado, não se esconda no escuro
Porque a luz vai brilhar novamente
Life Goes On, BTS*

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real de sensores que realizam a medição do potencial matricial do solo. Baseados nos conceitos de Internet das Coisas (IoT) foi realizada a integração da coleta dos dados com um armazenamento em um servidor web, onde os dados dos sensores são enviados via conexão Wi-Fi e protocolo MQTT, permitindo acesso e visualização em tempo real dos dados. Visando uma maior reprodutibilidade, o sistema foi prototipado utilizando a plataforma NodeMCU-32S ESP32, responsável por fazer a leitura dos dados dos sensores e envio dos mesmos para monitoramento remoto.

Através de constante monitoramento, é possível ter um controle maior dos insumos necessários para a produção agrícola. Para os recursos hídricos, cada vez mais escassos em várias regiões do planeta, é de suma importância o conhecimento das condições necessárias para acionar sua utilização no processo de irrigação. Com os dados necessários podemos evitar desperdícios, assim como ter o conhecimento do quanto e por quanto tempo é necessário irrigar. O monitoramento facilita o manejo desse recurso importantíssimo, e seu controle é possível utilizando sensores que auxiliam a verificação da umidade do solo, resultando em uma melhor utilização dos recursos hídricos disponíveis.

Palavras-chave: Monitoramento em Tempo Real; Potencial Matricial do Solo; Umidade do Solo.

Abstract

The present work aims to develop a real-time monitoring system of sensors that measure the soil matric potential. Based on the concepts of the Internet of Things (IoT), the integration of data collection with a storage on a web server was carried out, where sensor data is sent via Wi-Fi connection and the MQTT protocol, allowing real-time access and visualization of data. Aiming at greater reproducibility, the system was prototyped using the NodeMCU-32S ESP32 platform, which was responsible for reading the data from the sensors and sending them for remote monitoring.

Through constant monitoring, it is possible to have greater control of the raw materials needed for agricultural production. For water resources, which are increasingly scarce in various regions of the planet, knowledge of the necessary conditions to trigger their use in the irrigation process is of great importance. With the necessary data, we can avoid waste, as well as having the knowledge of how much and for how long it is necessary to irrigate. Monitoring facilitates the management of this very important resource, and its control is only possible using sensors that help to verify soil moisture, resulting in a better use of available water resources. ***Keywords: Real Time Monitoring; KW_2 ; Soil Matric Potential; KW_4 ; KW_5 .***

Lista de Figuras

2.1	Controle em malha aberta.	4
2.2	Controle em malha fechada.	5
2.3	Curva de retenção de água no solo (SWRC) para solo de teste de areia siltosa compactada [Patil et al., 2017].	6
2.4	Tensiômetro [de Azevedo and da Silva, 1999].	8
2.5	Diagrama MQTT.	9
3.1	Visão global do sistema proposto.	11
3.2	Sensor de Umidade do Solo Watermark 200SS [Irrometer, 2022].	12
3.3	Sensor de temperatura a prova d'água DS18B20.	13
3.4	NodeMCU-32S com microcontrolador ESP32-WROOM-32.	15
3.5	Divisor de tensão com resistor de 4.7 k Ω conhecido.	15
3.6	Sensor inserido em amostra de terra.	17
3.7	Plataforma IoT ThingSpeak [Thingspeak, 2022].	18
3.8	Modulo MicroSD com RTC.	19
3.9	Diagrama do fluxo do Sistema.	20
3.10	Protótipo do sistema de monitoramento.	20
4.1	Relação da resistência medida com o potencial matricial.	21
4.2	ThingSpeak data.	22

Lista de Tabelas

3.1 Tabela com materiais utilizados.	12
--	----

Lista de Símbolos

R Resistência.

T Temperatura

$k\Omega$ Quilo Ohms.

Lista de Abreviaturas

IC Instituto de Computação.

IoT Internet das Coisas

SWRC Curva de Retenção da Umidade do Solo

MCU Unidade de Microcontrolador

DC Corrente Contínua

AC Corrente Alternada

I²C Inter-Integrated Circuit

I²S Inter-IC Sound

UART Transmissor/Receptor Assíncrono Universal

SPI Interface Periférica Serial

MQTT Transporte de Telemetria de Enfileiramento de Mensagens

ADC Conversor Analógico-Digital

RTC Relógio em Tempo Real

USB Porta Serial Universal

Sumário

1	Introdução	1
1.0.1	Justificativa	2
1.0.2	Objetivos	2
1.0.3	Organização do trabalho	3
2	Referencial Teórico	4
2.1	Controle da irrigação	4
2.1.1	Controle em malha aberta	4
2.1.2	Controle em malha fechada	5
2.2	Curva de retenção da umidade do solo	5
2.2.1	Medição tensiométrica de umidade do solo	7
2.3	Internet das Coisas	8
2.4	Protocolo MQTT	8
3	Desenvolvimento	11
3.1	Design do sistema de monitoramento	11
3.2	Materiais	11
3.3	Sensores	12
3.3.1	Irrrometer Watermark 200SS	12
3.3.2	DS18B20 sensor de temperatura	13
3.4	Microcontrolador	13
3.4.1	ESP32	14
3.5	Leitura dos sensores	15
3.6	Calibração	17
3.7	Integração com serviço web	18
3.8	Data Logger	18
4	Resultados	21
4.1	Resultados da Calibração	21
4.2	Visualização dos dados	22

5 Conclusão	23
Bibliografia	24

Capítulo 1

Introdução

Até 2050, estima-se que a agricultura precisará produzir quase 50% mais alimentos, forragem para gado e biocombustíveis do que em 2012 para satisfazer a demanda global e manter o caminho para alcançar a “fome zero” até 2030. Mas o progresso feito na redução do número de pessoas subnutridas no início do século XXI foi revertido. O número subiu de 604 milhões em 2014 para 768 milhões em 2020. Embora existam perspectivas de atender às necessidades nutricionais de 9,7 bilhões de pessoas até 2050 em nível global, espera-se que os problemas com os padrões locais de produção e consumo piorem [FAO, 2021].

O aumento populacional e a crescente demanda por alimentos, promove proporcionalmente um aumento da produtividade das áreas de plantio e, conseqüentemente, a expansão de áreas irrigadas, produzindo um alto consumo de água e em alguns casos, desperdício dos recursos disponíveis pela falta de uma maior precisão em seu gerenciamento na agricultura [Cavalcanti et al., 2020].

Levando em consideração que a agricultura é um dos maiores consumidores de água, sendo ela responsável por consumir 85% da água potável disponível, existe uma urgência para criar estratégias baseadas em ciência e tecnologia para o uso sustentável da água [Jury and Vaux Jr, 2007].

Um desafio central para a agricultura é reduzir a degradação da terra e evitar mais poluição e perda de recursos ambientais, ainda assim mantendo os níveis de produção. Opções de gestão estão disponíveis para aumentar a produtividade e os níveis de produção se a inovação em gestão e tecnologia puder ser escalada para a transição para sistemas agroalimentares sustentáveis. No entanto, nenhum deles pode ir longe sem planejar e gerenciar recursos de terra, solo e água por meio de uma gestão do solo inteligente e efetiva da terra e da água [FAO, 2021].

O monitoramento da umidade do solo é um dos métodos que os agricultores podem utilizar para a programação da irrigação. Muitos tipos de sensores e sistemas de registro de dados foram desenvolvidos para esta finalidade ao longo dos anos, mas sua ampla adoção na programação prática da irrigação ainda é limitada [Payero et al., 2017].

Atualmente o monitoramento em tempo real de terras agrícolas é desenvolvido em

pequena escala e curto prazo devido ao alto custo de implantação e manutenção. Em uma perspectiva de longo prazo, as lições aprendidas com o monitoramento e a previsão de parâmetros para culturas específicas, em determinados locais e condições climáticas, podem ser muito instrutivas para auxiliar a adaptação de práticas culturais nos mesmos locais, com condições climáticas diferentes ou em outros locais com condições climáticas esperadas semelhantes [Weiss et al., 2020].

Conhecendo as propriedades exatas do solo, o agricultor não só consegue utilizar menos água para o cultivo, como também aumenta a produção e a qualidade, irrigando as plantas nos períodos críticos de seu crescimento. Sensores de umidade são comumente usados em combinação com controladores de sistemas de irrigação [Radman and Radonjić, 2017].

Precisamos de projetos mais genéricos com autonomia energética, de sistemas de monitoramento simples, a implementação de soluções com tecnologias mais robustas, que possam ser aplicados tanto em ambientes controlados como em áreas geograficamente isoladas. Com o monitoramento podemos impulsionar os rendimentos, reduzir as perdas e otimizar a irrigação, melhorando a utilização dos recursos.

Através de constante monitoramento, é possível ter um controle maior dos insumos necessários para a produção agrícola. Para os recursos hídricos, cada vez mais escassos em várias regiões do planeta, é de suma importância o conhecimento das condições necessárias para acionar sua utilização no processo de irrigação. Com os dados necessários podemos evitar desperdícios, assim como ter o conhecimento do quanto e por quanto tempo é necessário irrigar. O monitoramento facilita o manejo desse recurso importantíssimo, e seu controle só é possível utilizando sensores que verificam a umidade e temperatura do solo, resultando em melhor utilização dos recursos hídricos disponíveis.

1.0.1 Justificativa

A crescente demanda da produção de alimentos devido ao aumento da população mundial gera, de maneira equivalente, uma maior degradação e poluição da terra, além do desperdício de insumos agrícolas por falta de controle e rastreio. Esse é um campo de estudo que está aberto para pesquisa em diversas partes, desde do plantio até a distribuição e consumo de alimentos. A falta de dados sobre o tema, pouca digitalização, dificulta a utilização de técnicas computacionais mais elaboradas, como por exemplo, técnicas de aprendizagem de máquina, para predição e controle da gestão de práticas agrícolas.

1.0.2 Objetivos

Objetivos gerais

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real de sensores que realizam a medição do potencial matricial do solo, o

qual se relaciona diretamente com a umidade do solo, e pode ser aplicado a diversos tipos de solo. Baseados nos conceitos de Internet das Coisas (IoT) foi realizada a integração da coleta dos dados com um armazenamento em um servidor web, onde os dados dos sensores são enviados via conexão Wi-Fi e protocolo MQTT, permitindo acesso e visualização em tempo real dos dados. Visando uma maior reprodutibilidade, o sistema foi prototipado utilizando um módulo NodeMCU-32S ESP32, responsável por fazer a leitura dos dados dos sensores e envio dos mesmos para monitoramento remoto.

Objetivos específicos

- Estudo sobre umidade do solo
- Desenvolvimento do protótipo para leitura dos sensores
- Desenvolvimento do protótipo para monitoramento em tempo real

1.0.3 Organização do trabalho

Os capítulos seguintes descrevem cada etapa do desenvolvimento da solução. O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica. No capítulo 3 detalhamos os materiais utilizados, descrevendo as características dos componentes escolhidos, a metodologia utilizada para realizar a obtenção dos dados, a calibração dos sensores e conexão com o servidor web. O projeto desenvolvido e seus resultados são descritos no capítulo 4. As conclusões são descritas no capítulo 5.

Capítulo 2

Referencial Teórico

2.1 Controle da irrigação

A determinação da umidade dos solos é fundamental para os principais estudos de processos físicos, químicos e biológicos que neles ocorrem. Principalmente os que afetam o aumento da produtividade agrícola [Diniz et al., 2017].

A utilização de um sistema de controle para irrigação automatiza a ação de irrigar de uma maneira que é possível compensar perturbações provocadas por variações como as de temperatura, clima, solo e diferentes culturas aplicadas.

2.1.1 Controle em malha aberta

Os chamados sistemas de malha aberta são aqueles em que o sinal de saída não exercem nenhuma ação de controle no sistema. Isso quer dizer que, em um sistema de controle em malha aberta, o sinal de saída não é medido nem realimentado para posterior comparação com a entrada. Para cada entrada de referência teremos uma condição fixa de operação. Qualquer sistema de controle cujas operações são efetuadas em uma sequência baseada em tempo é pode ser considerado como um sistema de malha aberta [Ogata, 2011].



Figura 2.1: Controle em malha aberta.

Um sistema de irrigação que é acionado com temporizadores opera por meio de sinais, neste caso em função do tempo, pode ser considerado um sistema de malha aberta.

2.1.2 Controle em malha fechada

Em um sistemas de controle com retroalimentação, também chamados de sistemas de controle de malha fechada, o sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal de realimentação, realimenta o controlador, de modo a minimizar o erro e ajusta a saída do sistema ao valor desejado [Ogata, 2011].

Em um sistema de controle para irrigação para terras agrícolas ao obter as medidas como a umidade e temperatura do solo, podemos aplica-las como os sinais que realimentam o controlador responsável por calcular a saída do sistema, tomando a decisão de acionar a irrigação. No momento que a saída esperada é alcançada, que seria uma terra com conteúdo de água suficiente para o bom desenvolvimento de cada cultura específica aplicada à plantação, podemos cessar o processo de irrigação, evitando desperdícios dos recursos aplicados, e isso só é possível com o feedback das propriedades do solo, que são constantemente verificadas através de monitoramento.

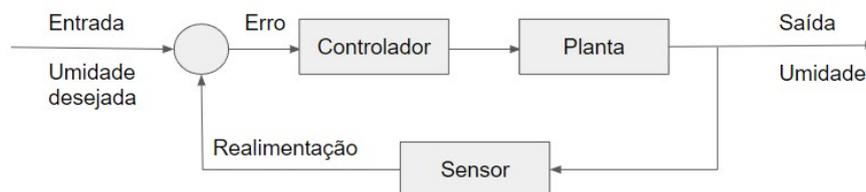


Figura 2.2: Controle em malha fechada.

2.2 Curva de retenção da umidade do solo

A curva característica do solo (do inglês soil water retention curve, SWRC) é o nome dado ao resultado gráfico da variação do conteúdo de água do solo em função do potencial matricial do solo. Podemos associar essa curva a uma equação, e o modelo mais utilizado é o proposto por [Van Genuchten, 1980]. Um diferencial desse modelo é que ele pode ser aplicado para os mais variados tipos de solo.

A equação apresenta θ como valor da umidade do solo ($cm^3 \times cm^{-3}$), θ_r é a umidade residual do solo ($cm^3 \times cm^{-3}$), que pode ser medido experimentalmente, por exemplo, determinando o conteúdo de água em um solo muito seco onde ocorre a murcha, θ_s é a

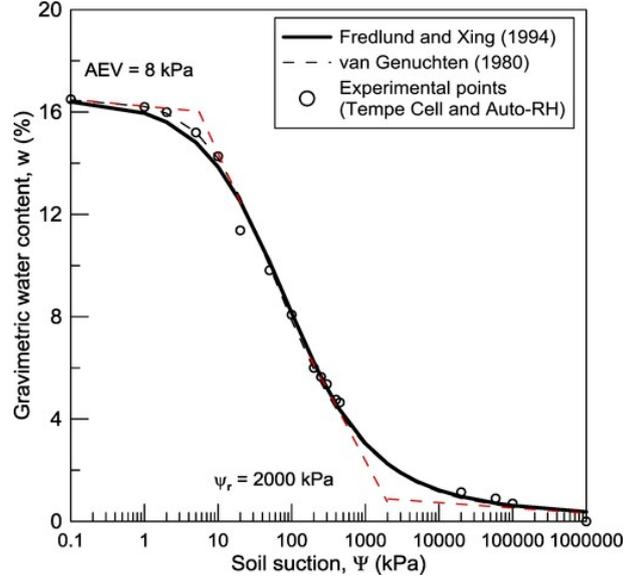


Figura 2.3: Curva de retenção de água no solo (SWRC) para solo de teste de areia siltosa compactada [Patil et al., 2017].

umidade saturada do solo ($cm^3 \times cm^{-3}$), que é facilmente obtido experimentalmente, α é um parâmetro de escala inversamente proporcional a média do diâmetro do poro (cm^1), n representa o índice de distribuição do tamanho dos poros, m é um coeficiente de ajuste, onde $m = 1 - \frac{1}{n}$, $0 < m < 1$ e h é o potencial matricial do solo (kPa).

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} \quad (2.1)$$

A equação proposta contém quatro parâmetros independentes (θ_r , θ_s , α e n) que podem ser estimados a partir de dados observados de retenção de água no solo. Para encontrar as o melhor ajuste dadas as medidas da umidade do solo e potencial hídrico, podemos estimar os parâmetros da equação 2.1 tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado e os dados observados. Temos que θ_i é a i -ésima medida da umidade do solo ($cm^3 \times cm^3$), h_i é a i -ésima medida do potencial matricial do solo (kPa), $\theta(h_i, X)$ é o valor da umidade do solo ($cm^3 \times cm^3$) calculado pela equação 2.1, $X(\theta_r, \theta_s, \alpha, n)$ são os parâmetros do vetor a ser otimizados e N é o número de dados amostrados.

$$\min f = \sum_{i=1}^N (\theta_i - \theta(h_i, X))^2 \quad (2.2)$$

Segundo [Diniz et al., 2017], uma grande vantagem de se obter a curva característica de um determinado tipo de solo é que, uma vez conhecida, é possível, a partir dela, estimar a umidade (θ) conhecendo o potencial matricial (h) ou vice-versa. Isso permite a utilização dos valores de um tensiômetro para o manejo da irrigação, sendo ele um

instrumento para medida do potencial hídrico do solo e uma vez que obtemos esse valor, através da curva característica podemos conhecer a umidade do solo. Para o manejo da irrigação, considerando os valores de umidade encontrados podemos identificar alguns exemplos de pontos de umidade muito relevantes, sendo eles:

- Umidade de saturação: indica quando o solo tem seus poros todos preenchidos com água;
- Umidade crítica: a partir desse valor o solo já está com um grande esgotamento de água e é necessária a irrigação;
- Umidade no ponto de murcha: indica que o teor de água no solo está abaixo do necessário para a planta continuar se desenvolvendo e começa a sofrer uma murcha.

2.2.1 Medição tensiométrica de umidade do solo

O tensiômetro mede a força física que retém a água no solo em Centibars (ou kPa) de tensão da água no solo. Seu princípio de funcionamento baseia-se na formação do equilíbrio entre a água presente no solo e a água contida no interior do aparelho no momento em que entram em contato.

No início, a água dentro do tensiômetro está sob pressão atmosférica, à medida que o solo seca, a água sai do tensiômetro através da cápsula porosa, criando um vácuo no interior do instrumento que é equivalente à tensão da água no solo. Como o instrumento é vedado a formação do vácuo permite a leitura de uma pressão negativa que representa o potencial do solo. Diferentes tipos de solo terão tensões diferentes com a mesma medição volumétrica, gerando informações volumétricas relativas às condições locais e muitas vezes exigindo calibração do local para leitura do equipamento.

Em comparação com outros métodos de controle da irrigação, o tensiômetro tem como vantagens o conhecimento em tempo real da tensão de água no solo e, indiretamente do teor de água no solo, partindo do conceito de potencial, é possível medir diretamente a energia de retenção da água pelo solo. O tensiômetro apresenta uma maior facilidade de uso, também possui um custo relativamente baixo e pode ser facilmente encontrado no comércio, permitindo maior aplicação por parte de agricultores irrigantes [de Azevedo and da Silva, 1999].

Devido ao fato de que os tensiômetros têm sido usados em pesquisas desde a década de 1920 e estão disponíveis comercialmente desde 1951, décadas de pesquisas publicadas por inúmeras universidades e agências de extensão produziram um amplo campo de referência para níveis de tensão recomendados para uso com culturas comuns e paisagens [Irrrometer, 2022].

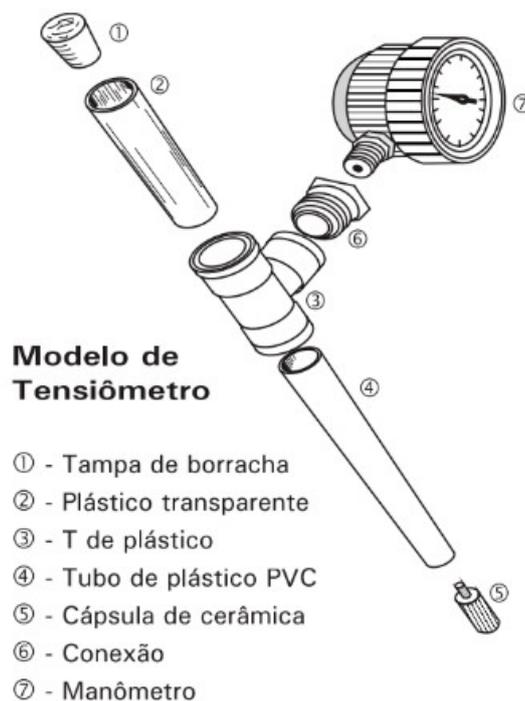


Figura 2.4: Tensiômetro [de Azevedo and da Silva, 1999].

2.3 Internet das Coisas

O advento da Internet das Coisas (IoT) trouxe a possibilidade de conectar os objetos do nosso dia-a-dia à Internet, permitindo que seus dados sejam acessíveis na web a qualquer hora e local. A capacidade de um sistema de se comunicar de forma transparente com outro sistema entre dispositivos heterogêneos inspirou a criação de ferramentas apropriadas, com as quais novas aplicações e serviços podem ser criados e agregam valor aos fluxos de dados produzidos na borda da rede.

Desenvolvimentos recentes nas tecnologias de IoT estão sendo usados em uma ampla variedade de aplicações, incluindo dispositivos vestíveis inteligentes, casa inteligente, cidade inteligente. Espera-se que o setor agrícola seja cada vez mais beneficiado pela aplicação da IoT. A aplicação dessas tecnologias na agricultura comercial ainda é muito limitada, mas pode oferecer oportunidades para melhorar, por exemplo, a programação da irrigação com base no monitoramento da umidade do solo, tornando os dados mais acessíveis aos agricultores.

2.4 Protocolo MQTT

O MQTT (do inglês Message Queuing Telemetry Transport) é um protocolo de mensagens de publish/subscriber, extremamente simples e leve, projetado para dispositivos com recursos limitados e redes de baixa largura de banda, alta latência ou não confiáveis

para redes TCP/IP. Os princípios de design são minimizar a largura de banda da rede e os requisitos de recursos do dispositivo, ao mesmo tempo em que tentam garantir a confiabilidade e algum grau de garantia de entrega da mensagem.

Definimos um dispositivo como um Publisher, em que ele publica informações em um formato pré-estabelecido. Em contrapartida temos um dispositivo Subscriber, que recebe as informações que estão sendo publicadas. Estabelecemos então uma relação de n para n onde várias informações são publicadas, e diversos dispositivos podem receber-las. Para o caso em que um dispositivo publique alguma informação que não está de acordo com o formato aceito, esta não será publicada, o que reduz o tráfego de informações não relevantes. O broker é um servidor um intermediário entre Subscribers e Publishers que gerencia e filtra o tráfego dos dados, que são armazenados em tópicos que servem de referência para o acesso das informações submetidas. Esses princípios tornam o protocolo

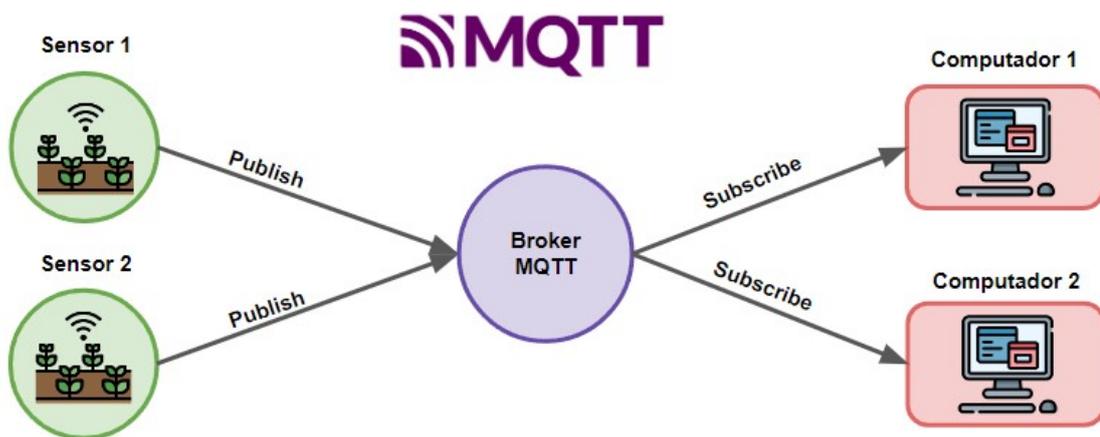


Figura 2.5: Diagrama MQTT.

MQTT ideal para o mundo IoT de dispositivos conectados e para aplicativos móveis onde a largura de banda e a energia da bateria são limitados [MQTT, 2022].

O protocolo MQTT foi inventado foram especificados vários requisitos:

- Implementação simples
- Entrega de dados de qualidade de serviço
- Leve e eficiente em largura de banda
- Dados agnósticos
- Consciência de sessão contínua

Esses objetivos até hoje estão no centro do MQTT. No entanto, o foco principal do protocolo mudou de sistemas incorporados proprietários para casos de uso abertos se adequando aos conceitos de IoT. Essa mudança de foco criou muita confusão sobre o significado da sigla MQTT. Nos dias atuais MQTT não é mais considerado um acrônimo, é simplesmente o nome do protocolo [HiveMQ, 2022].

Capítulo 3

Desenvolvimento

3.1 Design do sistema de monitoramento

Para o desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real do potencial matricial do solo, o modelo proposto foi desenvolvido em duas partes. Primeiro, a integração do sensor com o módulo NodeMCU-32s para a realização da leitura dos dados e calibração. Depois é desenvolvida a integração com um servidor web para armazenamento e visualização dos dados. O diagrama apresentado na Figura 3.1 mostra uma visão global do sistema.

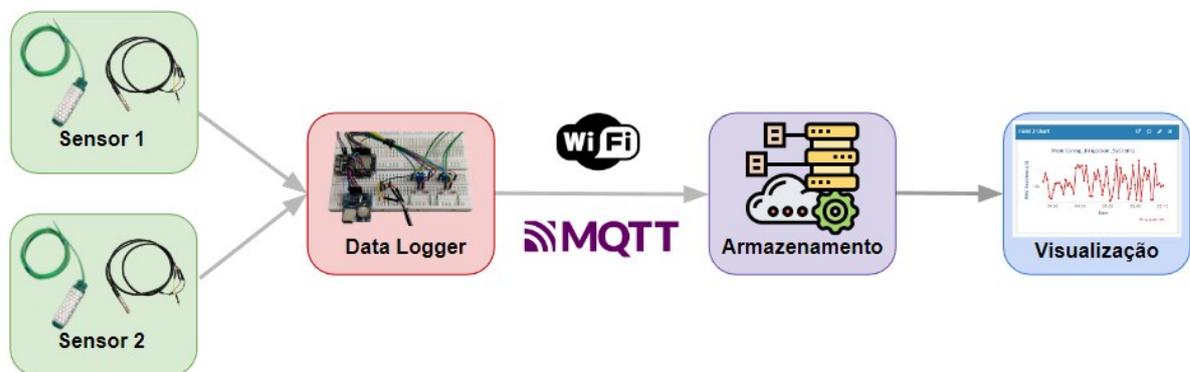


Figura 3.1: Visão global do sistema proposto.

3.2 Materiais

O protótipo do sistema utilizou materiais apresentados na Tabela 3.1 com o objetivo que fossem facilmente encontrados no mercado, obtendo uma maior reprodutibilidade do modelo proposto.

Material	Und.	Descrição
Irrrometer Watermark	2	Sensor que mede o potencial matricial do solo
DS18B2	1	Sensor de temperatura
NodeMCU-32s	1	Plataforma de prototipagem
Resistor	5	Resistor 4.7 k Ω
Diodo Zener	2	Proteção para o circuito
Jumper Macho-Macho	15	Comunicação do protótipo
Módulo SD com RTC	1	DataLogger

Tabela 3.1: Tabela com materiais utilizados.

3.3 Sensores

Os sensores são dispositivos eletrônicos capazes de responder a um estímulo, que pode ser físico ou químico e relacionado a uma ou mais propriedades do material do qual é feito o sensor, e transforma-lo em um sinal elétrico, que pode ser convertido em uma grandeza física diferente.

3.3.1 Irrrometer Watermark 200SS

O sensor Watermark 200SS é um dispositivo elétrico de estado sólido que detecta a resistência elétrica e é comumente usado para medir o potencial hídrico do solo, em vez da umidade do solo. O sensor consiste em um par de eletrodos altamente resistentes à corrosão que são incorporados em uma matriz granular. A corrente é aplicada à Watermark para obter um valor de resistência. O sensor correlaciona a resistência a Centibares (kPa) de tensão de água no solo [Irrrometer, 2022].



Figura 3.2: Sensor de Umidade do Solo Watermark 200SS [Irrrometer, 2022].

O sensor de potencial hídrico de matriz granular Watermark 200SS, também pode ser

utilizado para previsão da curva de retenção de umidade do solo. Algumas características dele incluem a medição que varia de 0 a -200 kPa, construção em aço inoxidável, estado totalmente sólido, não se dissolve no solo, não afetado por temperaturas de congelamento, compensação interna para níveis de salinidade comumente encontrados no solo, barato, fácil de usar e não necessita de constante manutenção.

As leituras do Watermark 200SS são calibradas para refletir os mesmos valores que seriam medidos por um tensiômetro. Isentos de manutenção e com uma vida útil esperada de mais de 5 anos, esses sensores podem ser deixados no solo permanentemente. Este sensor requer energia mínima para ler e é perfeitamente adequados para registro de dados ou dispositivos IoT [Irrrometer, 2022].

3.3.2 DS18B20 sensor de temperatura

O DS18B20 é um sensor de temperatura digital, que possui resolução de temperatura de 9-bits a 12-bits sendo configurado através de um protocolo interno digital chamado One-wire. Possui uma velocidade de medição na faixa de 750 ms para a resolução ao mais alta e pode ser acoplado a vários outros sensores de temperatura através do mesmo barramento [ALLDatasheet, 2022].



Figura 3.3: Sensor de temperatura a prova d'água DS18B20.

O sensor DS18B20 possui uma faixa de tensão para operação que varia de 3V a 5,5V. Sua faixa de medição é de -55°C a 125°C , com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Por ser encapsulado em aço inoxidável ele permite a operação em ambientes molhados.

3.4 Microcontrolador

Podemos definir microcontrolador como um circuito integrado programável que reúne um núcleo de processador, memórias voláteis e não voláteis, e periféricos de entrada e

de saída de dados. Por seu tamanho reduzido é ideal para ser utilizado em sistemas embarcados e sistemas de tempo real, tornam-se econômicos para controlar digitalmente dispositivos e processos. Algumas aplicações de em sistemas automatizados variam desde ferramentas elétricas, brinquedos à sistemas de controle de carros e dispositivos médicos.

O desenvolvimento de dispositivos microcontroladores de baixo custo e de código aberto tem a capacidade de integrar sistemas de monitoramento, que podem ser voltados para produção agrícola, através de tecnologias de comunicação sem fio, como rádio, WiFi e bluetooth, oferecendo oportunidades para sistemas de monitoramento das propriedades do solo mais acessíveis e eficazes.

3.4.1 ESP32

ESP32-WROOM-32 é um poderoso microcontrolador dual-core (MCU) integrado com módulo Wi-Fi e Bluetooth que visa uma ampla variedade de aplicações, desde redes de sensores de baixa potência até as tarefas mais exigentes, como codificação de voz, streaming de música e decodificação de MP3 [Espressif, 2022].

Existem dois núcleos de CPU que podem ser controlados individualmente e a frequência de clock da CPU é ajustável de 80 MHz a 240 MHz. O chip também possui um coprocessador de baixo consumo que pode ser usado no lugar da CPU para economizar energia durante a execução de tarefas que não exigem muito poder computacional, como monitoramento de periféricos. O ESP32 pode integrar um rico conjunto de periféricos, desde sensores de toque capacitivos, interface de cartão SD, Ethernet, SPI de alta velocidade, UART, I²S e I²C. O ESP32 pode funcionar como um sistema autônomo completo ou como um dispositivo escravo para um MCU host, reduzindo a sobrecarga da pilha de comunicação no processador principal do aplicativo.

O ESP32 é capaz de funcionar de forma confiável em ambientes industriais, com uma temperatura de operação que varia de -40°C a $+125^{\circ}\text{C}$. Projetado para dispositivos móveis, eletrônicos vestíveis e aplicativos de IoT, o ESP32 atinge um consumo de energia muito baixo com uma combinação de vários tipos de software proprietário. O sistema operacional escolhido para o ESP32 é o freeRTOS com LwIP e o TLS 1.2 com aceleração de hardware também está integrado.

NodeMCU-32s

O NodeMCU-32S é uma plataforma de prototipagem baseada no ESP32, que é comumente utilizada no desenvolvimento de projetos IoT. A placa já conta com conversor USB serial integrado e porta micro USB para alimentação e programação. O controlador do NodeMCU-32S em questão é o módulo ESP-WROOM-32. A alimentação dessa placa pode ser feita através do próprio conector USB (5.0V) ou então através do pino VIN, com uma alimentação regulada de 5.0V.



Figura 3.4: NodeMCU-32S com microcontrolador ESP32-WROOM-32.

3.5 Leitura dos sensores

Para medir a resistência dentro do sensor Irrometer Watermark, é usado um circuito divisor de tensão. O circuito usa uma tensão de entrada conhecida, tensão de saída e valor do resistor em série para calcular o valor de outro resistor, neste caso a resistência do sensor. Na Figura 3.5 é um exemplo simples usando um pino digital para alimentação e uma entrada analógica para ler e medir a resistência do sensor [Irrometer, 2022].

Como os sensores Watermark fornecem um caminho direto da terra para qualquer dispositivo, a proteção via diodos Zener foi incluída em todas as linhas de sensores.

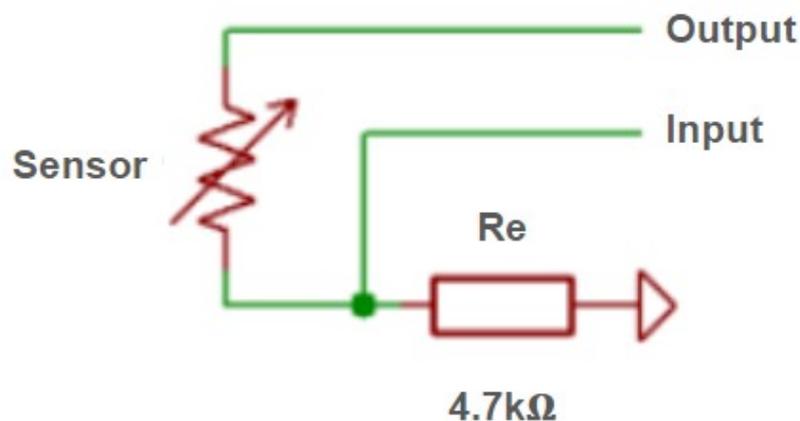


Figura 3.5: Divisor de tensão com resistor de 4.7 kΩ conhecido.

Seguindo o modelo de [Payero et al., 2017] o sensor foi primeiro energizado configurando-se em HIGH, com 3.3V, um dos dois canais digitais conectados ao divisor de tensão enquanto o outro estava em LOW. Então, um atraso de 100 ms foi realizado antes de fazer uma leitura para permitir que os efeitos de capacitância se estabilizassem.

Uma leitura analógica foi então feita, usando o conversor analógico digital (ADC) para produzir uma saída inteira. Outra leitura foi feita invertendo a polaridade de excitação e média entre as duas leituras foi calculada. Este processo foi repetido dez vezes, resultando em uma leitura média.

Nesse processo um "pseudo AC" foi criado alternando a direção da corrente de uma breve excitação DC por quantidades iguais de tempo. Os pinos de saída são alternados e isolados, com a segunda leitura revertendo a carga da anterior. Isso deixa o sensor sem potencial acumulado, imediatamente pronto para leituras subsequentes.

O intervalo da saída depende da resolução do ADC. Como o módulo NodeMCU possui um ADC de 10 bits, logo a saída é dada na faixa de 0 a 1023 (1024 valores). A leitura média, V_s , foi então convertida para uma saída de tensão (V_{out}), com base na tensão de entrada ou excitação ($V_{in} = 3.3V$) como:

$$V_{out} = V_s \times \frac{V_{in}}{1023.0} \quad (3.1)$$

Em seguida, a resistência do sensor, R ($k\Omega$), foi calculada como:

$$R = \frac{[R_e \times (V_{in} - V_{out})]}{V_{out}} \quad (3.2)$$

onde, R_e = resistência usada no divisor de tensão (4.7 $k\Omega$).

Segundo os estudos de [Shock et al., 1998], a temperatura do solo também deve ser levada em consideração para obter o potencial hídrico. As equações de calibração obtidas em sua pesquisa indicaram que a compensação de temperatura estava relacionada ao potencial hídrico, com maior efeito da temperatura na leitura do sensor em maior tensão de água no solo, implicando que quando os efeitos da temperatura são ignorados, o erro no potencial estimado do solo será maior.

Foi então utilizado o sensor DS18B20 digital a prova d'água, Figura 3.3, para realizar a leitura da temperatura do solo. Ele é um sensor de simples instalação e manejo, necessário para compor os parâmetros necessários para se calcular a tensão de água no solo.

O resultado da medição foi aplicado nas equações de [Allen, 2000], um estudo que encontrou três equações para modelar a tabela de calibração disponível nas referências do sensor Watermark. Para encontrar os valores referentes ao potencial matricial do solo em kPa temos que:

Para valores de R menores do que 550 Ω :

$$P = 0 \quad (3.3)$$

Para valores de R menores do que 1 $k\Omega$ a equação, que foi recentemente atualizada nas

referências do sensor, é definida como:

$$P = (23.156R - 12.736) \times -(1 + 0.018 \times (T - 24)) \quad (3.4)$$

Para valores de R maiores do que $1k\Omega$ e menores do que $8k\Omega$ temos:

$$P = \frac{(-3.213R - 4.093)}{(1 - 0.009733R - 0.01205T)} \quad (3.5)$$

Para valores de R maiores do que $8k\Omega$ definimos:

$$P = -2.246 - 5.239R(1 + 0.018(T - 24)) - 0.06756R^2(1 + 0.018(T - 24))^2 \quad (3.6)$$

Onde P é o potencial de água do solo em kPa (centibares), R é a resistência medida em $k\Omega$ e T é a temperatura do solo em °C.

Uma vez que a resistência é conhecida, o valor pode ser calibrado para a tensão da água no solo por meio de uma série de equações ou tabelas de consulta de referência.

3.6 Calibração

Os dois sensores Watermark, disponíveis para o estudo, foram submersos em água por 24 horas e então instalados molhados em um recipiente preenchido com solo saturado como pode ser visto na Figura 3.6. O solo foi deixado para secar à temperatura ambiente por vinte e quatro dias (25 de junho de 2022 a 18 de julho de 2022) e o sua resistência, assim como a temperatura do solo e o resultado da conversão para potencial matricial, foram registrados a cada 20 segundos.



Figura 3.6: Sensor inserido em amostra de terra.

A calibração dos sensores, que verificam o potencial matricial do solo, requer começar com um sensor saturado e o equilíbrio precisa ser estabelecido entre o solo e o sensor para obter uma leitura representativa. Devido à necessidade de estabelecer o equilíbrio, pode ocorrer um atraso de tempo entre as mudanças na umidade do solo e uma mudança correspondente na leitura dos sensores.

3.7 Integração com serviço web

Para a aplicação de monitoramento remoto do potencial matricial, adquirido via a leitura dos sensores, é necessária a conexão com um servidor web que vai servir como o host dos dados coletados. O [Thingspeak, 2022], plataforma IoT, foi utilizado por ser gratuito e configurada facilmente para receber dados de microcontroladores baseados em Arduino. A plataforma permite que os clientes atualizem e recebam atualizações de feeds de canal por meio do agente ThingSpeak MQTT. Um dispositivo cliente se conecta ao broker MQTT e pode publicar em um canal ou assinar atualizações desse canal.

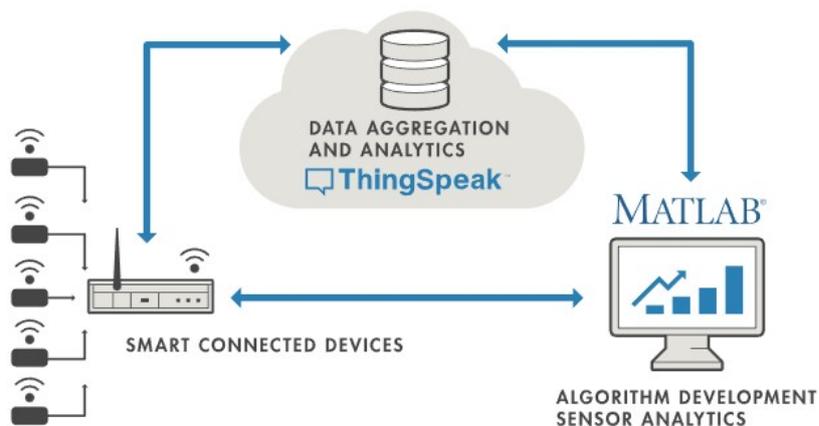


Figura 3.7: Plataforma IoT ThingSpeak [Thingspeak, 2022].

Após a criação do canal ThingSpeak, ele pode ser usado para processar e visualizar os dados com código MATLAB. O sistema atribui um código único a cada canal onde o microcontrolador utiliza essa chave para direcionar os dados para o canal específico. O sistema foi configurado para serem enviados dados a cada 20 segundos.

3.8 Data Logger

A conexão com o servidor web se deu utilizando Wi-Fi (IEEE 802.11), e após alguns dias de monitoramento por causa da conexão instável com a Internet, ocorreu perda

dos dados coletados. Em um ambiente no qual o monitoramento atua de maneira decisiva em um sistema, uma falha que resulte na perda dos dados implica diretamente na produtividade.

O conceito de um Data Logger se apresenta como um registrador de dados ao longo do tempo ou sobre a localização com um instrumento ou sensor embutido ou por meio de instrumentos e sensores externos. O objetivo é atingir baixa produção custos, fornecer comunicação sem fio e ser flexível para alterações de software e hardware.

Para evitar a perda dos dados por falha de conexão com a Internet, foi integrado no protótipo um módulo MicroSD para salvar os dados assim que forem coletados. O módulo também conta com um real-time clock (RTC) que monitora a data e a hora de cada medição, fornecendo um tempo preciso quando microcontrolador ler os dados dos sensores. O RTC se comunica diretamente com a ESP32 através de um barramento de circuitos inter-integrados (I²C) e possui uma bateria dedicada permitindo que o tempo seja rastreado continuamente mesmo que o registrador de dados não seja alimentado.



Figura 3.8: Módulo MicroSD com RTC.

Seguindo o modelo utilizado por [Melo et al., 2021], para um sistema IoT de monitoramento em tempo real de variáveis climáticas e geração fotovoltaica para aplicação em rede inteligente, após a inicialização dos sensores, duas tasks foram atribuídas a cada um dos núcleos do ESP32 para serem executadas em paralelo.

A primeira task é responsável pela leitura dos dados dos sensores e é executada a cada minuto. Ele contém um loop que realiza o registro do tempo marcado pelo RTC e os valores da leitura dos sensores. Depois de calcular as medidas necessárias, um timestamp é obtido do RTC. Em seguida, os resultados e os registros de data e hora são salvos no arquivo de dados do cartão SD.

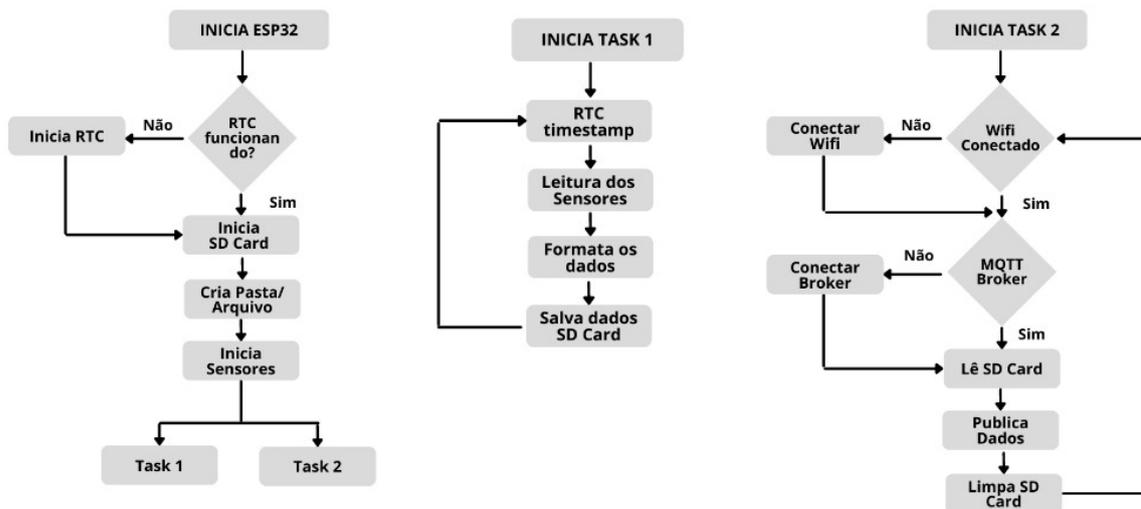


Figura 3.9: Diagrama do fluxo do Sistema.

A segunda task é realizada a cada vinte segundos, utilizando a função delay, e gerencia os arquivos no cartão SD e a comunicação com o Thingspeak. Esse intervalo foi definido com base no limite da frequência de envio de informações através de um Publisher delimitada pelo próprio servidor da plataforma web. O intervalo de tempo também foi pensado de uma maneira que não iria interferir na execução da primeira task. Cada vez que a segunda tarefa é executada, é verificado se há dados no cartão SD a serem enviados. Após publicada a mensagem no servidor web o conjunto de dados enviado é removido do cartão SD e um novo conjunto é preparado para envio.

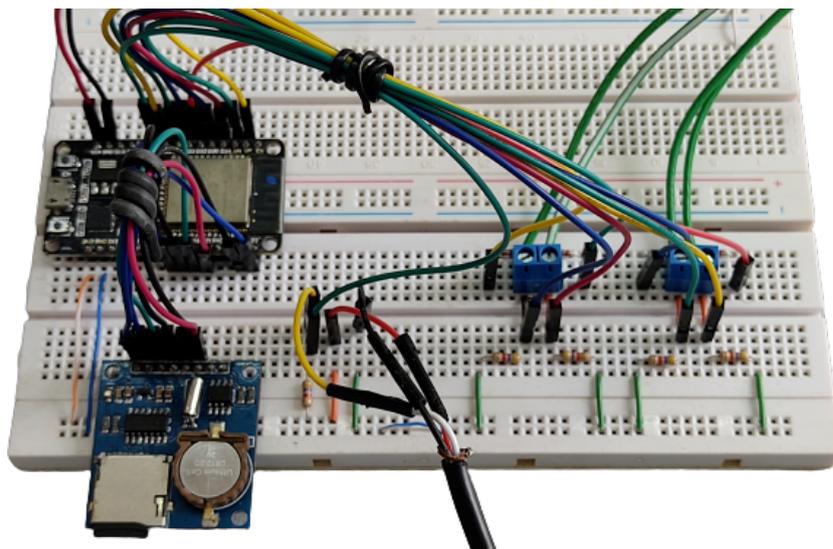


Figura 3.10: Protótipo do sistema de monitoramento.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Resultados da Calibração

Durante um período de vinte e quatro dias foram registrados cerca de noventa e quatro mil entradas com os valores dos dois sensores Watermark 200ss. Foram observados no sensor Watermark 1 valores entre -49 a -160 kPa e para o sensor Watermark 2 obtemos valores entre -49 a -130 kPa. Os resultados podem ser observados na Figura 4.1. O sistema funcionou bem dentro da faixa indicada pelo fabricante do sensor, de 0 a -200 kPa. Mas podemos observar que a medida que o solo foi ficando mais seco, com valores menores que -80 kPa, a leitura apresentava valores inconsistentes com o esperado.

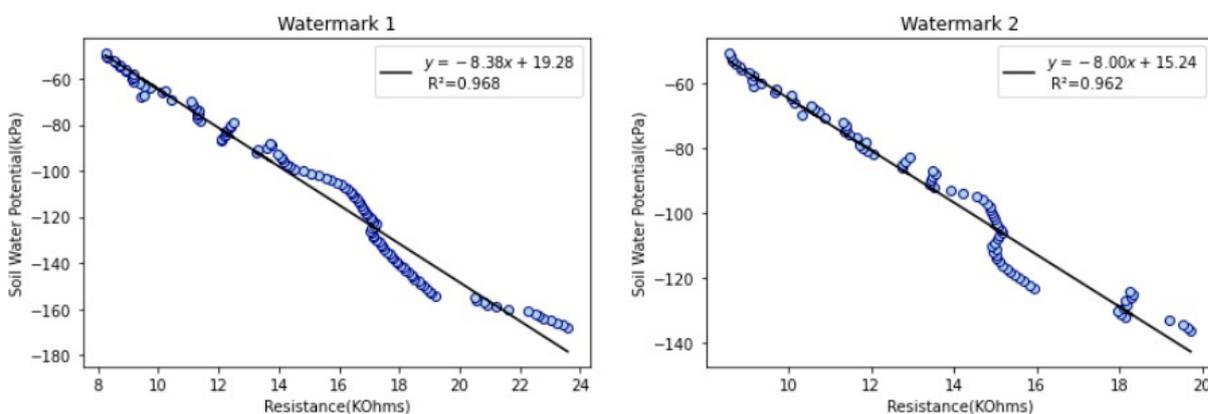


Figura 4.1: Relação da resistência medida com o potencial matricial.

Os gráficos da Figura 4.1 representam a relação da resistência medida pelo ESP32 com o potencial matricial calculado. A partir desses dados temos os pontos com a curva de ajuste. Veja que os pontos seguem uma regressão linear, por isso optamos por uma reta que melhor se adapta aos dados. A equação da reta de calibração dos dois sensores podem ser vistas nas equações 4.1 e 4.2.

$$y_1 = -8,38x + 19,28 \quad (4.1)$$

$$y_2 = -8,00x + 15,24 \quad (4.2)$$

O erro relativo a regressão linear aplicada aos dados coletados foi medido utilizando o erro médio quadrático (R^2). Quando ajustada uma linha ao seu conjunto de dados, para a maioria dos valores de x há uma diferença entre o valor de y que seu modelo estima e o valor de y real que você tem em seu conjunto de dados. O valor R^2 é um número entre 0 e 1, e quanto mais próximo de 1, mais preciso é o seu modelo de regressão linear. As duas equações obtidas apresentaram uma boa relação linear com valores de erro aproximados $R_1^2 = 0,968$ e $R_2^2 = 0,962$.

4.2 Visualização dos dados

O sistema registrou os dados de maneira precisa a cada vinte segundos e foi possível visualizar os dados sendo atualizados em tempo real, como é possível observar na Figura 4.2. A natureza dos dados apresentados indica que a resolução de 10 bits do ADC do microcontrolador foi suficientemente preciso para representar a faixa de valores da saída dos sensores.

A implementação do data logger utilizando os dois cores da ESP32 do módulo NodeMCU se mostrou eficiente, visto que os dados continuaram a ser registrados independente do estado da conexão Wi-fi com a internet.



Figura 4.2: ThingSpeak data.

Capítulo 5

Conclusão

O protótipo modelado correspondeu aos requisitos propostos, que foi desenvolvimento de um sistema de monitoramento em tempo real de sensores que realizam a medição do potencial matricial do solo.

Existem alguns pontos que podem ser aprimorados. É necessária uma análise mais a fundo de como a temperatura afeta o cálculo do potencial matricial do solo. As equações utilizaram referências de temperaturas que variavam de 15°C a 25°C. É importante fazer uma verificações para casos onde existem variações mais altas de temperaturas em certas regiões de plantio.

A partir do potencial hídrico do solo é possível adquirir a curva de retenção da umidade do solo, e no futuro, estudos sobre o controle de sistemas de irrigação podem ser realizados, aplicando técnicas de predição mais sofisticadas, permitindo otimizar o processo de irrigação e aumentar a confiabilidade.

Com relação ao monitoramento, para melhorar o serviço, é pensada a implementação de mensagens em um servidor que vai comportar os dados dedicado, mais flexível às necessidades do projeto, e evitar a necessidade de recorrer a um serviço web pago.

É necessário também pensar na autonomia energética da solução. É possível desenvolver protótipo para que ele possa ser alimentado com baterias, as quais seriam recarregadas automaticamente através de painéis solares fotovoltaicos.

Todas essas melhorias permitem a integração com um sistema irrigação automatizado. O sistema também poderia contar com técnicas de aprendizado de máquina para prever o melhor momento para acionar a irrigação, unindo os dados coletados dos sensores com outros dados meteorológicos.

Bibliografia

- [ALLDatasheet, 2022] ALLDatasheet (2022). Ds18b20 datasheet (pdf) - dallas semiconductor. Last accessed 19 July 2022.
- [Allen, 2000] Allen, R. (2000). Calibration for the watermark 200ss soil water potential sensor to fit the 7-19-96 “calibration# 3” table from irrometer. *University of Idaho, Kimberley, Idaho, USA*.
- [Cavalcanti et al., 2020] Cavalcanti, A. J. F. N., Correia, F. P., and Brito, J. A. (2020). Validação de uma rede de sensores sem fio aplicada à fruticultura irrigada do vale do são francisco. *Brazilian Applied Science Review*, 4(5):2763–2780.
- [de Azevedo and da Silva, 1999] de Azevedo, J. A. and da Silva, E. M. (1999). *Tensiômetro: dispositivo prático para controle da irrigação*. Embrapa Cerrados.
- [Diniz et al., 2017] Diniz, A. M. et al. (2017). *Sistema automatizado de aquisição, em tempo real, de umidade e temperatura do solo na irrigação*. PhD thesis, Universidade Estadual do Oeste do Paraná.
- [Espressif, 2022] Espressif (2022). Esp32-wroom-32. Last accessed 13 July 2022.
- [FAO, 2021] FAO (2021). The state of the world’s land and water resources for food and agriculture – systems at breaking point. *Synthesis report 2021*, pages 1–82.
- [HiveMQ, 2022] HiveMQ (2022). Introducing the mqtt protocol - mqtt essentials: Part 1. Last accessed 13 July 2022.
- [Irrometer, 2022] Irrometer (2022). Soil moisture sensors. Last accessed 13 July 2022.
- [Jury and Vaux Jr, 2007] Jury, W. A. and Vaux Jr, H. J. (2007). The emerging global water crisis: managing scarcity and conflict between water users. *Advances in agronomy*, 95:1–76.
- [Melo et al., 2021] Melo, G. C. G. d., Torres, I. C., Araújo, Í. B. Q. d., Brito, D. B., and Barboza, E. d. A. (2021). A low-cost iot system for real-time monitoring of climatic variables and photovoltaic generation for smart grid application. *Sensors*, 21(9):3293.

- [MQTT, 2022] MQTT (2022). Mqtt. Last accessed 13 July 2022.
- [Ogata, 2011] Ogata, K. (2011). Engenharia de controle moderno. 5^a.
- [Patil et al., 2017] Patil, U., Puppala, A., Hoyos, L., and Pedarla, A. (2017). Modeling critical-state shear strength behavior of compacted silty sand via suction-controlled triaxial testing. *Engineering Geology*, 231:21–33.
- [Payero et al., 2017] Payero, J. O., Mirzakhani-Nafchi, A., Khalilian, A., Qiao, X., and Davis, R. (2017). Development of a low-cost internet-of-things (iot) system for monitoring soil water potential using watermark 200ss sensors. *Advances in Internet of Things*, 7(3):71–86.
- [Radman and Radonjić, 2017] Radman, V. and Radonjić, M. (2017). Arduino-based system for soil moisture measurement. In *Proc. 22nd Conference on Information Technologies IT*, volume 17, pages 289–292.
- [Shock et al., 1998] Shock, C. C., Barnum, J. M., and Seddigh, M. (1998). Calibration of watermark soil moisture sensors for irrigation management.
- [Thingspeak, 2022] Thingspeak (2022). Data collection in the cloud with advanced data analysis using matlab. Last accessed 19 July 2022.
- [Van Genuchten, 1980] Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5):892–898.
- [Weiss et al., 2020] Weiss, M., Jacob, F., and Duveiller, G. (2020). Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sensing of Environment*, 236:111402.