

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

**ANDRIGO PIAI LIUCCI
MARCOS SIKORA DE ARAUJO**

**COMUNICAÇÃO SEM FIO ENTRE SENSORES APLICADA A SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO**

CURITIBA

2022

**ANDRIGO PIAI LIUCCI
MARCOS SIKORA DE ARAUJO**

**COMUNICAÇÃO SEM FIO ENTRE SENSORES APLICADA A SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO**

Wireless communication between sensors applied to irrigation systems

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Eletrônica do Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Dr. Bruno Sens Chang

Coorientador: Dr. Hermes Irineu Del Monego

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**ANDRIGO PIAI LIUCCI
MARCOS SIKORA DE ARAUJO**

**COMUNICAÇÃO SEM FIO ENTRE SENSORES APLICADA A SISTEMAS DE
IRRIGAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica
do Curso de Bacharelado em Engenharia
Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal
do Paraná.

Data de aprovação: 26/Maio/2022

Bruno Sens Chang
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Hermes Irineu Del Monego
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luciano Scandelari
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Kleber Kendy Horikawa Nabas
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA
2022**

Dedicamos este trabalho às nossas amadas esposas, Mayara e Natalia, que sempre nos impulsionaram a alcançar voos mais altos. E aos nossos pais, que possibilitaram toda essa jornada, do começo ao fim – sem eles, nós não teríamos chegado até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente à Deus, por ser nossa luz nos momentos de escuridão.

À nossa amada família, pelo suporte incondicional.

E aos nossos colegas de curso, fundamentais em nosso processo de aprendizagem.

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um dispositivo que permite a comunicação sem fio entre sensores, tendo como base um dispositivo eletrônico desenvolvido pelo aluno Lucas B. Tsuchiya, que tem como objetivo realizar o controle, monitoramento e acionamento de sistemas de irrigação. O principal objetivo deste projeto é a remoção dos cabos utilizados para a comunicação entre os sensores e o módulo de controle. Essa erradicação possibilita aplicações mais robustas, devido à simplificação da montagem de todo o equipamento de aquisição, ao aumento do alcance entre os sensores e o módulo controlador, como também a irrelevância da utilização de cabos específicos. O projeto é composto por diversos sensores para a aquisição de dados e três microcontroladores ESP32 para o desenvolvimento da comunicação sem fio e sem acesso a internet. Além dos microcontroladores para aquisição de dados, o projeto contará com uma Raspberry Pi para o desenvolvimento do módulo de acionamento. A partir dos dados coletados com o equipamento desenvolvido, foi possível analisar e demonstrar que a comunicação sem fio entre sensores - utilizando os protocolos ESP-NOW e MQTT - é eficiente e possível de ser aplicada em áreas domésticas, assim como para grandes plantações.

Palavras-chave: comunicação; sensores; sem fio.

ABSTRACT

This work presents the study and development of a device that allows wireless communication between sensors and an electronic device developed by student Lucas B. Tsuchiya, which aims to control, monitor and activate irrigation systems. The main functionality of this project is the removal of cables used to communicate between the sensors and the control module, enabling more robust applications, due to: Simplified assembly of all acquisition equipment, increased range between sensors/ controller module and the irrelevance of using specific cables. The project will consist of several sensors for data acquisition, three ESP32 microcontrollers for the development of wireless communication and without internet access and in addition to the microcontrollers for data acquisition, the project will have a Raspberry Pi for the development of the drive. From the data collected with the developed equipment, it was possible to demonstrate that wireless communication between sensors using the ESP-NOW and MQTT protocols is efficient and possible to be used in domestic applications and even for large plantations.

Keywords: communication; sensors; wireless.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Visão Geral do projeto	17
Figura 2 – Fases de desenvolvimento de uma cultura.	21
Figura 3 – Representação saída sensor	23
Figura 4 – Arquitetura Cliente-Servidor	25
Figura 5 – Visão geral da integração dos componentes do projeto	26
Figura 6 – Dispositivos de Comunicação Wireless	27
Figura 7 – Sensor de umidade do solo	28
Figura 8 – Módulo comparador do sensor de umidade do solo	29
Figura 9 – Sensor de detecção de chuva	29
Figura 10 – Sensor de Luminosidade LDR	30
Figura 11 – Sensor de temperatura e umidade relativa do ar DHT11	31
Figura 12 – (a) Sensor de Pressão Atmosférica BMP180 (b) Circuito BMP180	32
Figura 13 – Power Bank Max	33
Figura 14 – Sensor de temperatura DS18B20	33
Figura 15 – Sensor de Fluxo de Água	34
Figura 16 – Sensor Ultrassônico HC-SR04	35
Figura 17 – ESP-32	36
Figura 18 – Relé de acionamento, sendo a) módulo com 4 canais e b) estrutura interna do relé.	37
Figura 19 – Mapeamento dos pinos no DevKit DOIT ESP32	38
Figura 20 – Mapeamento das GPIO's no Raspberry Pi 3B	38
Figura 21 – One-way Communication	39
Figura 22 – Multiple master Communication	39
Figura 23 – Multiple slave Communication	40
Figura 24 – Two-way Communication	40
Figura 25 – Topologia de rede estrela	42
Figura 26 – Exemplo MQTT	43
Figura 27 – Topologia de rede estrela	43
Figura 28 – Fluxograma das etapas da metodologia adotada	45
Figura 29 – Arquitetura do projeto	47

Figura 30 – Diagrama esquemático da placa de aquisição de dados	48
Figura 31 – Montagem do sensor umidade do solo	49
Figura 32 – Montagem do sensor de chuva	50
Figura 33 – Montagem do sensor Luminosidade	50
Figura 34 – Montagem do sensor temperatura e umidade do ar	51
Figura 35 – Montagem do sensor de Pressão Atmosférica	51
Figura 36 – Montagem do sensor de Temperatura para o tanque de água	52
Figura 37 – Montagem do sensor de Fluxo de água	52
Figura 38 – Montagem do sensor de Nível	53
Figura 39 – Montagem do Módulo Relé	53
Figura 40 – Esquemático das Placas de circuito impresso	54
Figura 41 – Montagem da Placa de circuito impresso	54
Figura 42 – Fluxograma do sistema de acionamento do dispositivo	57
Figura 43 – Diagrama de caso de uso sistema web	58
Figura 44 – Montagem do dispositivo em bancada	59
Figura 45 – Tela de login	60
Figura 46 – Tela de monitoramento do dispositivo	60
Figura 47 – Distância entre módulos	61
Figura 48 – Redução de custos	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de cultura Kc em função do seu estágio de desenvolvimento . . .	22
Tabela 2 – Materiais utilizados no desenvolvimento do projeto com suas respectivas funções	27
Tabela 3 – Especificações técnicas sensor LDR	30
Tabela 4 – Especificações técnicas sensor DHT11	31
Tabela 5 – Especificações técnicas sensor digital de pressão BMP180	32
Tabela 6 – Especificações técnicas do Power Bank	33
Tabela 7 – Especificações técnicas sensor DS18B20	34
Tabela 8 – Especificações técnicas do sensor de fluxo YF-201	34
Tabela 9 – Especificações técnicas sensor HC-SR04	35
Tabela 10 – Especificações técnicas ESP32	36
Tabela 11 – Especificações técnicas do módulo SRD-05VDC-SL-C	37
Tabela 12 – Variáveis utilizadas no controle e monitoramento do sistema	46

LISTA DE SIGLAS

Siglas

MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PCI	Placa de Circuito Impresso
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
DNS	<i>Domain Name System</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
CSS	<i>Cascading Style Sheet</i>
RF	Rádio Frequência
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
NTC	<i>Negative Temperature Coefficient</i>
bit	<i>Binary Digit</i>
EEPROM	<i>Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory</i>
I2C	<i>Inter Integrated Circuit</i>
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i>
LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
ADC	Conversor Analógico-Digital
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
IoT	<i>Internet of Thing</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>

IMAP	<i>Internet Message Access Protocol</i>
POP3	<i>Post Office Protocol</i>
SMTP	<i>Simple Mail Transfer Protocol</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

LISTA DE SÍMBOLOS

ET_o	Evapotranspiração de referência	[mm]/dia
R_n	Radiação líquida na superfície da cultura	[(MJ/m ²)]/dia
G	Densidade do fluxo de calor do solo	[(MJ/m ²)]/dia
T_2	Temperatura do ar a 2 metros de altura	°C
u_2	Velocidade do vento a 2 metros de altura	m/s
e_s	Pressão de vapor de saturação	kPa
e_a	Pressão atual de vapor	kPa
$e_s - e_a$	Deficit de pressão de vapor de saturação	kPa
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor de satura x temperatura	kPa/°C
γ	Constante psicrométrica	kPa/°C

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	16
1.3	Estrutura do Trabalho	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1	Princípios de Irrigação	19
2.2	Evapotranspiração	20
2.3	Sensores	22
2.4	Atuador	23
2.5	Sistema Embarcado	23
2.6	Dashboard	24
3	MATERIAIS	26
3.1	Comunicação Wireless	27
3.2	Placa de Aquisição de Dados	28
3.2.1	Sensor de Umidade do Solo	28
3.2.2	Sensor de Chuva	29
3.2.3	Sensor de Luminosidade	30
3.2.4	Sensor de Temperatura e Umidade relativa	30
3.2.5	Sensor de Pressão Atmosférica	31
3.2.6	Power Bank	32
3.2.7	Sensor de Temperatura para o tanque de água	33
3.2.8	Sensor de Fluxo de Água	34
3.2.9	Sensor Ultrassônico	35
3.2.10	ESP-32	35
3.2.11	Módulo relé de acionamento	36
3.3	Placas de Desenvolvimento	37
3.3.1	GPIO	37
3.4	Software	38
3.4.1	Protocolo ESP-NOW	38
3.4.1.1	Particularidades ESP-NOW	41

3.4.2	Topologia de rede	41
3.4.3	MQTT	42
3.4.4	Mosquitto	43
3.4.5	Servidor NGINX	43
3.4.6	Python	44
3.4.7	HTML	44
3.4.8	CSS	44
4	MÉTODOS	45
4.1	Desenvolvimento	46
4.1.1	Placa de aquisição de dados	47
4.1.2	Leitura do sensor de umidade de solo	49
4.1.3	Leitura do sensor de detecção de água	49
4.1.4	Leitura do sensor de luminosidade LDR	50
4.1.5	Leitura do sensor de Temperatura e Umidade relativa do ar	50
4.1.6	Leitura do sensor de Pressão Atmosférica	51
4.1.7	Leitura do sensor de Temperatura para o tanque de água	52
4.1.8	Leitura do sensor de Fluxo de água	52
4.1.9	Leitura de Nível	53
4.1.10	Controle do Módulo Relé	53
4.1.11	Construção da placa de circuito impresso	54
4.1.12	Roteiro do cálculo da evapotranspiração	54
4.1.13	Algoritmo	57
4.1.14	Pagina Web	58
5	ANÁLISE DE RESULTADOS	59
5.1	Protótipo - Hardware	59
5.2	Protótipo - Software	59
5.3	Comunicação Sem fio	60
5.4	Comparação de custos	61
6	CONCLUSÃO	63
6.1	Projeto anterior e projetos futuros	63
6.2	Considerações finais	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A produtividade agrícola depende de diversos fatores, e a tecnologia de irrigação se enquadra em um desses pontos. Comparada com métodos tradicionais, que dependem das chuvas, a irrigação planejada pode aumentar os resultados na lavoura de duas a três vezes, em média. Optar e investir em métodos de irrigação tecnológicos traz diversos benefícios, que podem otimizar processos e proporcionar impactos positivos na lucratividade do negócio (TOTVS, 2020). Com base nesta demanda, são necessárias a pesquisa e a aplicação de tecnologias na agricultura e agropecuária, visando as oportunidades para desenvolvimento de soluções e melhorias de processos no segmento do agronegócio.

Com o objetivo de consolidar uma melhoria contínua nos processos de irrigação na agricultura de produção de alimentos, o presente trabalho apresenta a implementação de uma atualização técnica-funcional no dispositivo eletrônico desenvolvido pelo Lucas B. Tsuchiya como seu Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia da Computação em 2019 (TSUCHIYA, 2020). O dispositivo visa melhorar o gerenciamento de recursos hídricos em cultivos vegetativos através do controle e estimação da quantidade necessária de água e horário ótimo para irrigação dos mesmos, utilizando cálculos de evapotranspiração.

O dispositivo atualmente funciona de forma cabeada, o que limita sua aplicabilidade, por ser necessário utilizar cabos específicos e que encarecem a implantação física, o que muitas vezes desmotiva economicamente os envolvidos. A atualização principal proposta para o protótipo é a retirada dos cabos utilizados para a comunicação e a inserção de microcontroladores ESP-32 para possibilitar uma aquisição de dados utilizando a topologia de rede estrela e de maneira *wireless*, utilizando o protocolo ESP-NOW como forma de captação de dados. Todo o processamento dos dados será feito através de uma Raspberry Pi 3, e a comunicação entre ESP-32 e Raspberry será feita também de maneira *wireless*, utilizando o protocolo MQTT. Com isso o projeto visa ampliar o público alvo desde pequenas estufas até grandes fazendas.

1.1 Motivação

De acordo com a ONU (2012), a população mundial em 2024 será superior a 8 bilhões de pessoas, e em 2050, superior a 9,5 bilhões, exigindo maior oferta de alimentos. O crescimento populacional, o aumento no consumo per capita, na renda per capita e a expansão das cidades nas próximas décadas fazem mais presente o debate sobre a incapacidade de atender às novas necessidades humanas (SAATH, 2018). Esse cenário apresenta um grande desafio para a agricultura: aumentar a produtividade dos alimentos para a população mundial. Um dos maiores aliados dos produtores para vencer esse desafio é a utilização de sistemas de irrigação. Na agricultura irrigada, as demandas hídricas das culturas são supridas pela água da chuva e/ou de irrigação. A produção não é influenciada pela incerteza temporal e locacional das chuvas, permitindo-se produzir em qualquer época do ano. A agricultura irrigada representa 17%

da agricultura e produz aproximadamente 40% da produção de alimento do mundo. A sua importância fica mais evidente se for levado em consideração que existe uma limitação física para o crescimento da agricultura de sequeiro, o que indica que, no futuro, a produção de alimentos será cada vez mais dependente da agricultura irrigada (EMBRAPA, 2020).

A irrigação é uma técnica de fornecimento de água que, quando utilizada em conjunto com as demais boas práticas agrônômicas permite alcançar máxima produção (BOAS, 2017). E através dessa técnica é possível aumentar significativamente a oferta e regularidade de disponibilização de alimentos e outros produtos agrícolas.

Com a crescente aceitação e expansão das áreas irrigadas, também estão surgindo consequências sobre a má utilização dos recursos hídricos, como desperdício de água, danos ao solo e também à própria planta. Estudos demonstram que atualmente quase 50% do volume de água utilizado na irrigação das plantações é perdido pelo fenômeno da evaporação. Além disso, ocorre a contaminação da água em lençóis freáticos por meio de agrotóxicos e outros produtos que afetam a qualidade desse bem precioso (EOS, 2017). Portanto, é necessário que seja feito o gerenciamento eficiente da técnica para evitar o consumo excessivo e errôneo dos recursos hídricos da região. E para isso, é indispensável a utilização de sensores e recursos computacionais para garantir uma boa correlação entre o ambiente que a planta se encontra e suas necessidades básicas.

Com os avanços da tecnologia, profissionais e pesquisadores buscam utilizar inovações para auxiliar nas boas práticas da agricultura e, assim, automatizar e controlar dados importantes do plantio. Além de garantir maior precisão na periodicidade da irrigação, o que nem sempre é possível em sistemas não automatizados, por acúmulo de tarefas na propriedade ou simplesmente falha humana, a automação do sistema de irrigação também possibilita programar regas e realizar a fertirrigação de acordo com a necessidade da planta (NAANDANJAIN, 2015).

1.2 Objetivos

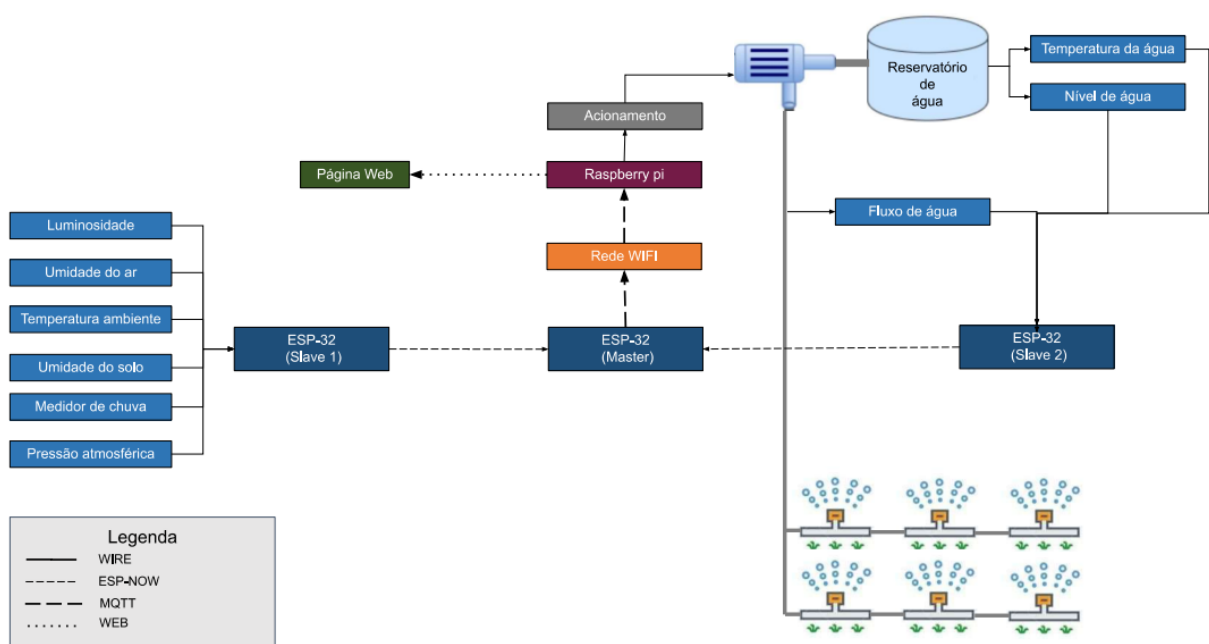
Este trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um sistema microcontrolado que faça a aquisição de dados de um conjunto de sensores de maneira wireless, e para isso, serão utilizados os protocolos ESP-NOW e MQTT, aplicados à irrigação em cultivos agrícolas. O sistema será capaz de estimar a quantidade de água necessária para o cultivo, além de controlar os acionamentos do sistema de irrigação de maneira autônoma. Para possibilitar essa automação, serão utilizados os dados obtidos pelos sensores e informações pré-estabelecidas sobre o tipo de cultura a ser irrigada, em conjunto com cálculos de evapotranspiração de culturas vegetativas. Todos os dados coletados e analisados, serão apresentados em um dashboard compatível com dispositivos móveis e desktops. Os objetivos principais deste trabalho são:

- Projeto e desenvolvimento do hardware para integrar sensores eletrônicos de maneira wireless;

- Desenvolvimento de software para comunicação entre estação de aquisição e placa de desenvolvimento;
- Facilitar a montagem de todo o equipamento de aquisição e evitar a utilização de cabos específicos que encarecem e implantação física.

A Figura 1 exemplifica uma aplicação do sistema eletrônico para controle e monitoramento da irrigação em cultivo vegetativo. Para aquisição e pré-tratamento de dados dos sensores, são utilizados duas ESP-32 nomeadas de Slave 1 e Slave 2. A Slave 1 é responsável pela leitura do grupo de sensores de luminosidade, umidade do ar, medidor de chuva, umidade do solo, temperatura ambiente e pressão atmosférica. Já a Slave 2 é responsável pela aquisição de dados dos sensores de fluxo de água, nível do reservatório de água e temperatura da água do reservatório. Esses dados pré-processados são enviados para a ESP-32 Master utilizando o protocolo ESP-NOW, que trata-se de uma comunicação via MAC address entre as ESPs, evitando assim a necessidade de utilização de um roteador Ethernet de grande potência para criação de uma rede privada entre os sensores e o módulo de processamento. Após a recepção dos dados pela ESP-32 Master, os dados serão enviados para a Raspberry através do protocolo MQTT, e esta fará o processamento final para estimar o momento que deve ser realizada a irrigação e a determinação do fluxo de água que deve ser utilizado. O Acionamento é o módulo responsável pela ligação entre o dispositivo eletrônico e o sistema hidráulico (bomba de sucção e mangueiras). A Raspberry também será responsável por apresentar os dados tratados em uma página web, que pode ser acessada de qualquer dispositivo móvel ou desktop após realizado o login do usuário.

Figura 1 – Visão Geral do projeto.



Fonte: Autoria própria.

1.3 Estrutura do Trabalho

Este trabalho é organizado em cinco partes, separadas da seguinte maneira:

- **Fundamentação teórica:** Apresentação do estudo dos principais conceitos envolvidos no trabalho;
- **Materiais:** Descrição dos principais sensores e módulos utilizados na montagem do projeto;
- **Métodos:** Descrição da metodologia e dos principais procedimentos técnicos para o desenvolvimento do projeto;
- **Análise de resultados:** Apresentação do desenvolvimento final do projeto, validação dos objetivos proposto e dos resultados obtidos;
- **Conclusão:** Considerações finais e trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

No presente capítulo serão descritos de maneira geral os principais conceitos utilizados no desenvolvimento do projeto.

2.1 Princípios de Irrigação

A técnica de irrigação na agricultura tem como principal função o abastecimento e distribuição de água às lavouras, com o objetivo principal de combater a seca. O conceito de irrigação no agronegócio hoje se tornou mais amplo devido à sua produtividade e lucratividade nos ativos agrícolas, com foco na sustentabilidade e nas preocupações ambientais (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Projetos de irrigação que visam maximizar os rendimentos requerem planejamento e operações consistentes, pesquisa e compreensão das inter-relações entre solo, água, plantas, atmosfera e manejo de irrigação (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Nesta seção, serão explicados os conceitos e variáveis envolvidos nos cálculos para estimar a quantidade de água necessária para um sistema de irrigação (TSUCHIYA, 2020).

O solo desempenha um papel importante na agricultura produtora de alimentos e é considerado um grande reservatório para as plantas, onde as mudanças na umidade determinam a quantidade de água armazenada. O solo é composto por partículas sólidas, líquidas e gasosas, onde o volume do sólido é praticamente fixo, enquanto o gás e o líquido rompem o espaço permeável do solo (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Em um cronograma de irrigação, a umidade do solo precisa ser calculada para determinar a quantidade de água a ser fornecida às culturas. A umidade do solo é definida como a razão entre a massa de água e a massa de solo seco. Para determinar a umidade do solo, existem diversos métodos e equipamentos, as principais diferenças entre eles são a forma de medição, custo, tempo de resposta e operabilidade em campo (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Foi utilizado um sensor eletrônico de umidade do solo para estimar a variação de água no solo (TSUCHIYA, 2020).

As informações meteorológicas desempenham um papel muito importante na agricultura, auxiliando no planejamento das atividades de plantio e auxiliando no uso dos sistemas de irrigação. O plano envolve o cálculo da evapotranspiração, precipitação (chuva) e tempo ideal de irrigação. Os principais dados climáticos utilizados geralmente são temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluviométrica e radiação solar. Existem vários tipos de sensores que podem ser utilizados para este fim (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Para medir os principais dados meteorológicos deste trabalho, são utilizados sensores de temperatura ambiente, umidade relativa do ar, umidade do solo, sensores de chuva e sensores de pressão atmosférica (TSUCHIYA, 2020).

Determinar a quantidade de água necessária para a irrigação é um dos principais fatores para dimensionar, planejar e gerenciar adequadamente um sistema de irrigação. Portanto, é importante avaliar a quantidade e a qualidade dos recursos hídricos disponíveis. Além de au-

mentar os custos de irrigação, o excesso de água na irrigação pode levar à destruição e perda de nutrientes no solo. Por outro lado, quando a quantidade de água é subestimada, há problemas com o desenvolvimento das lavouras, resultando em baixos rendimentos (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). Uma das estratégias para calcular a quantidade de água necessária é através do conceito de evapotranspiração, que basicamente determina a quantidade de água que uma planta precisa, levando em consideração sua genética e possíveis perdas devido às condições ambientais (TSUCHIYA, 2020).

2.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o conceito fundamental que determina quanta água uma planta precisa e, portanto, quanta irrigação ela precisa. A evapotranspiração consiste na soma dos fenômenos de evaporação e transpiração da superfície das plantas (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). O nível de evaporação da água que ocorre no solo é aproximadamente o mesmo que em um recipiente livre com as mesmas condições atmosféricas. O processo de transpiração envolve o movimento da água, que ocorre entre o solo e as plantas até atingir a atmosfera na forma de vapor através dos estômatos (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). As condições climáticas são o principal fator que determina a quantidade de água evapotranspirada (TSUCHIYA, 2020).

A evapotranspiração de referência (ETo) e da cultura ($ETpc$) podem ser calculadas através destes conceitos. A ETo indica a demanda de água da área com base nas condições climáticas locais. $ETpc$ está relacionado com a cultura a ser irrigada. Toda cultura possui seu coeficiente de cultura (Kc). O valor de Kc está relacionado ao estágio de desenvolvimento da cultura. O valor de Kc pode ser obtido a partir de uma tabela ou gráfico construído a partir dos resultados de pesquisas (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). Aplicando a equação de Penman-Monteith (FAO), determina-se o cálculo da ETo (TSUCHIYA, 2020).

$$ETo = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_2 + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34u_2)} \quad (1)$$

O quadro 1 apresenta a descrição e unidade de medida das variáveis da equação de Penman-Monteith.

Ao consultar a definição de cálculo de evapotranspiração, a evapotranspiração potencial de uma cultura pode ser determinada. Aplicando o método padrão de FAO obtém-se a relação entre ETc e $ETpc$, e o valor de ETc é multiplicado pelo valor de Kc (coeficiente de cultura) para obter a definição de cálculo de $ETpc$, equação (2) (TSUCHIYA, 2020).

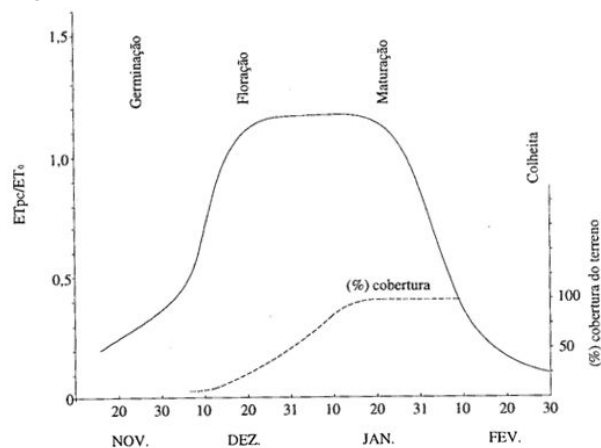
$$ETpc = ETo \cdot Kc \quad (2)$$

Quadro 1 – Quadro com a descrição das variáveis da equação de Penman-Monteith

Variável	Significado	Unidade de medida
E_{To}	Evapotranspiração de referência	mm/dia
R_n	Radiação líquida na superfície da cultura.	$(MJ/m^2)/dia$
G	densidade do fluxo de calor do solo	$(MJ/m^2)/dia$
T_2	temperatura do ar a 2 m de altura	$^{\circ}C$
u_2	velocidade do vento a 2 metros de altura	m/s
e_s	pressão de vapor de saturação	kPa
e_a	pressão atual de vapor	kPa
$e_s - e_a$	Deficit de pressão de vapor de saturação	kPa
Δ	Declividade da curva de pressão de vapor de satura x temperatura	$kPa/^{\circ}C$
γ	Constante psicrométrica	$kPa/^{\circ}C$

Fonte: Mantovani 2006.

O coeficiente de cultura K_c é definido por seus estágios de desenvolvimento associados ao ciclo da planta, levando em consideração as condições climáticas (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006). A abordagem de FAO divide o ciclo da cultura em 4 estágios: no estágio 1, o processo de germinação ocorre até 15% do seu crescimento vegetativo; já na fase 2 a cultura atinge de 70% a 80% do seu desenvolvimento; na fase 3 se inicia o processo de maturação, ou estágio de produção; finalmente, na fase 4 ocorre o término da maturação, ou estágio da colheita (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). A correlação entre a evapotranspiração e o ciclo da cultura em determinados períodos, e a porcentagem de cobertura da planta na superfície do terreno é apresentada figura 2. Pode-se identificar que a evapotranspiração é menor nas fases de germinação e de colheita, em relação às fases de floração e maturação (TSUCHIYA, 2020).

Figura 2 – Fases de desenvolvimento de uma cultura.

Fonte: (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

A tabela 1 apresenta a descrição dos estágios de desenvolvimento e os respectivos valores de referência de K_c .

Tabela 1 – Coeficiente de cultura Kc em funo do seu estágio de desenvolvimento

Estágio de desenvolvimento	Caracterização do estágio	Kc
Inicial (1)	Da germinação até a cultura cobrir 10% da superfície do terreno, ou 10 a 15% do seu desenvolvimento vegetativo	0,2 a 1,0
Secundário ou de desenvolvimento vegetativo (2)	Do final do primeiro estágio até a cultura cobrir de 70% a 80% da superfície do terreno ou atingir de 70% a 80% do seu desenvolvimento vegetativo.	Varia linearmente entre os valores do primeiro e terceiro estágio.
Intermediário ou de produção (3)	Do final do segundo estágio até o início da maturação. Também denominado estágio de produção.	0,9 a 1,25
Final ou de maturação (4)	Do início da maturação até a colheita ou final da maturação.	Varia linearmente entre os valores do primeiro e terceiro estágio e 0,3 a 1,0

Fonte: (BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2006).

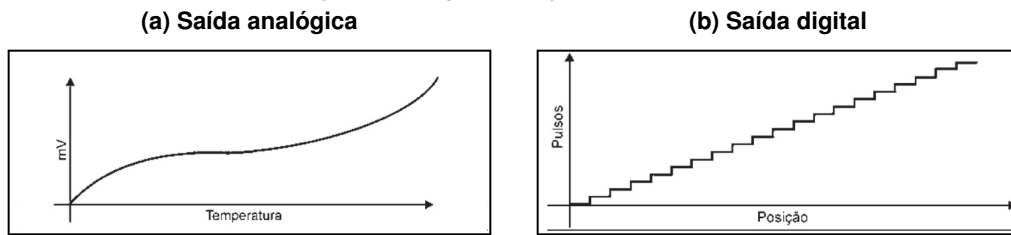
Pode-se estimar a demanda hídrica em qualquer região de acordo com a cultura que está sendo irrigada, aplicando a equação (2) e utilizando os valores de Kc obtido na literatura científica (MANTOVANI; BERNARDO; PALARETTI, 2009). A unidade de medida das equação de evapotranspiração de referência e da cultura é dada por [mm/dia]. Esta medida descreve a pluviosidade, ou seja, a unidade de medida de precipitação, ou quantidade de chuva, e também descreve o consumo de água na irrigação: 1 mm corresponde a 10.000 L/ha (CONCEIÇÃO, 2005). Tomando com exemplo um cultivo com necessidades hídricas de de 250 mm durante seu ciclo inicial, esta medida corresponderia a um volume de $2500 \text{ m}^3/\text{ha}$ de água (TSUCHIYA, 2020).

2.3 Sensores

Todas as características e condições de um ambiente específico são apresentadas por grandezas químicas e físicas. Para fazer a aquisição dessas grandezas é necessária a utilização de um dispositivo eletrônico chamado sensor. Trata-se de um instrumento capaz de realizar a leitura de variações físicas no ambiente, que podem ser térmicas, cinéticas, luminosas, entre outras, possibilitando relacionar grandezas mensuráveis, como temperatura, aceleração, e luminosidade, com grandezas elétricas como tensão, corrente e resistência. Através do sensor, toda grandeza física detectada é transformada em um sinal elétrico de tensão ou corrente por meio de um transdutor, permitindo a interpretação por um controlador (THOMAZINI; ALBURQUERQUE, 2011).

Os sensores podem fazer a transmissão dos dados de duas maneiras: analógica ou digital. O sinal digital apresenta valores discretos (e.g. 0,1,2,3,4,5), descontínuos no tempo e na amplitude, limitando a faixa de frequência dos dados aferidos e a sua oscilação numérica. Já o sinal analógico, apresenta variações infinitas entre cada um de seus valores (e.g. 0.01, 0.526,

Figura 3 – Representação saída sensor



Fonte: (THOMAZINI; ALBURQUERQUE, 2011).

4.56537), o que resulta em uma faixa de frequência bem maior, e por esse motivo não é tão confiável, e possui qualidade inferior, devido à oscilação. A figura 3 ilustra as diferenças entre os tipos de saídas de um sensor: a figura 3a apresenta a saída de um sensor analógico em função da temperatura, enquanto a figura 3b apresenta a saída de um sensor digital em função da variação da posição de um objeto (THOMAZINI; ALBURQUERQUE, 2011).

2.4 Atuador

Para um controle efetivo dos acionamentos do projeto, é necessário a utilização de um atuador. Trata-se de um dispositivo eletrônico que tem como objetivo realizar acionamentos através de sinais de comando, e o atuador a ser utilizado neste projeto é o relé de acionamento. O relé é um interruptor eletromecânico cuja movimentação física ocorre quando a corrente elétrica percorre as espiras da bobina do relé, criando assim um campo eletromagnético que por sua vez atrai a alavanca responsável pela mudança do estado dos contatos (MATTEDE, 2014).

2.5 Sistema Embarcado

Para que seja possível manipular os dados obtidos pelos sensores e também realizar o controle de acionamentos do atuador, faz-se necessária a utilização de um sistema embarcado. Trata-se de um equipamento dedicado à execução de leitura e processamento de dados e operações lógicas, e que possibilita o desenvolvimento de dashboards para que seja feita a interação homem-máquina.

Um Sistema Embarcado é um sistema microprocessado no qual o computador é completamente encapsulado ou dedicado ao dispositivo ou sistema que ele controla. Diferente de computadores de propósito geral, como o computador pessoal, um sistema embarcado realiza um conjunto de tarefas predefinidas, geralmente com requisitos específicos (CANALTI, 2017).

Este dispositivo pode ser dividido em duas partes: o *hardware* e o *software*. O *hardware* é a parte física do dispositivo, sendo composto por circuitos eletrônicos que têm como principal componente a unidade central de processamento, ou CPU. O *software* é a parte lógica, formada por um conjunto de instruções e regras que controlam e descrevem as funcionalidades

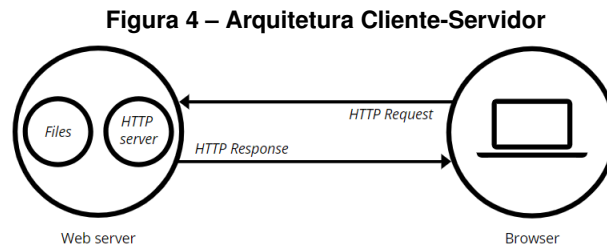
do sistema embarcado (SCHNEIDER; ANDRADE, 2010). Esse dispositivo eletrônico possibilita o desenvolvimento de projetos de automação, controle e monitoramento de sistemas.

Neste projeto, será feita a interação do módulo de desenvolvimento ESP-32 com a Raspberry Pi 3 como *hardware*, em conjunto com o ambiente de desenvolvimento integrado do Arduino e Raspberry Pi. Foi escolhido o microcontrolador ESP-32 como interface de comunicação entre sensores devido ao seu protocolo de comunicação próprio (ESP-NOW) e também devido à sua grande versatilidade no desenvolvimentos de projetos de automação e IoT, bem como seu baixo custo e alta disponibilidade no mercado. Já a Raspberry Pi 3 foi escolhida como central de acionamento e processamento, devido à sua robustez e ao custo viável para o desenvolvimento do projeto.

2.6 Dashboard

O dashboard trata-se de um painel de controle, com o objetivo de apresentar dados já consolidados e arranjados em apenas uma tela, de modo que toda a informação monitorada possa ser visualizada de forma interativa pelo utilizador (pessoa ou organização). A utilização dessas informações orientam e auxiliam o produtor na elaboração de estratégias para o desenvolvimento de sua produção. Para esta finalidade, foi utilizado o recurso de software chamado *Web Server*, que fornece serviços e meios de comunicação e interação do usuário com o sistema, por meio de navegadores web.

Os servidores web podem ser divididos em duas partes: *Hardware* e *Software*. A parte referente ao *Hardware* é um computador que armazena arquivos que compõem os sites (por exemplo, documentos HTML, imagens, folhas de estilo e arquivos JavaScript) e os entrega para o dispositivo do usuário final, que está conectado à Internet e pode ser acessado através do seu nome de domínio (DNS). A parte referente ao *Software* inclui diversos componentes que controlam a maneira como os usuários acessam os arquivos hospedados (armazenados para disponibilização), sendo necessário no mínimo um servidor *hypertext transfer protocol* para estabelecer a base da comunicação e transferência do conteúdo na web (MOZILLA, 2021). Como o servidor web se baseia na arquitetura cliente-servidor, este atende às requisições do cliente, estabelece uma conexão entre si, e transfere os recursos e conteúdos do servidor para o cliente - que usualmente realiza estas solicitações por meio de um navegador web para (ZAMBENEDETTI; CARISSIMI; ROCHOL, 2006). Com modelo de arquitetura e protocolo de comunicação, torna-se possível hospedar um conteúdo de páginas web em um servidor para que outros usuários possam ter acesso e visualizar seu conteúdo. A figura 4 apresenta a arquitetura cliente-servidor e seu funcionamento: o cliente faz uma requisição HTTP para o servidor e este responde à solicitação do cliente conforme sua disponibilidade.



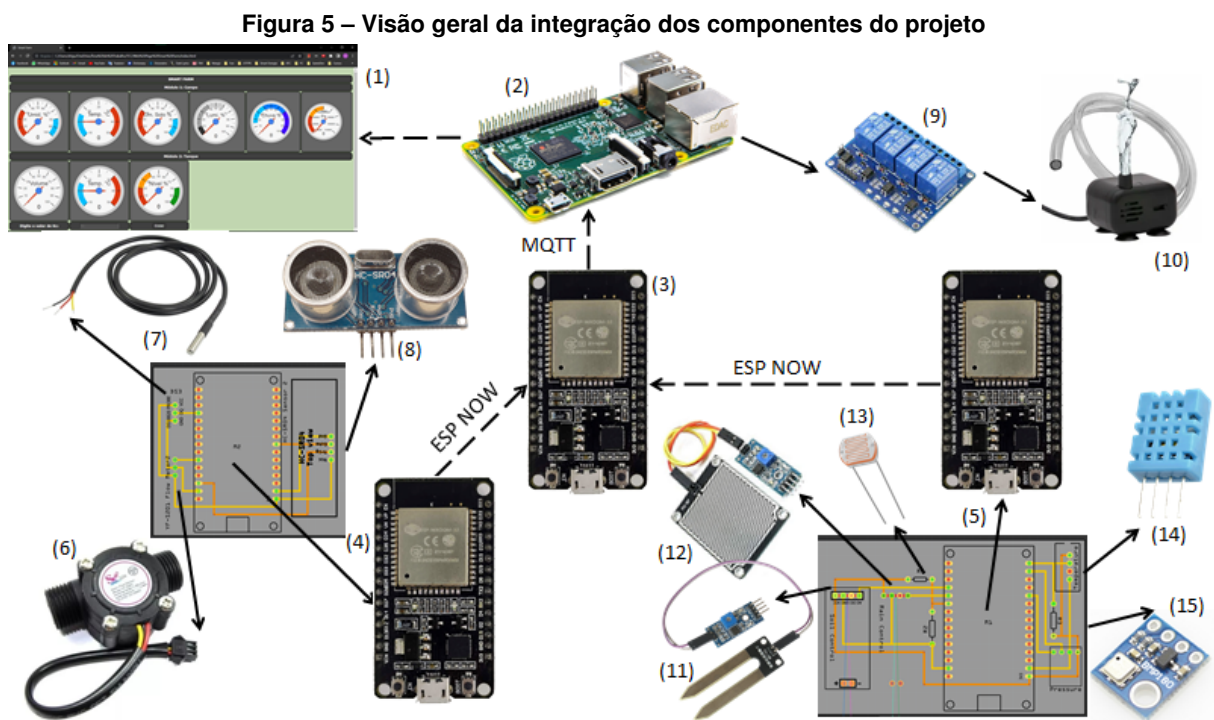
Fonte: (MOZILLA, 2021).

Com base nestes conceitos, é possível disponibilizar as informações da leitura dos sensores e dos dados já processados, proporcionando para o usuário a visualização e monitoramento das condições do sistema e do ambiente utilizando um navegador web de qualquer dispositivo suportado, como smartphones ou computadores.

3 MATERIAIS

Neste capítulo serão abordados os principais materiais e suas características técnicas, e também os recursos de software utilizados para o desenvolvimento do projeto. Para isso, serão apresentadas características e funcionalidades básicas de ambos recursos e materiais. No capítulo 4 será explicado como os componentes de hardware foram montados e como foram desenvolvidas as funcionalidades do software de aquisição e armazenamento de dados, assim como a interface web utilizando as tecnologias de software descritas neste capítulo.

A figura 5 mostra uma visão geral da integração entre estes, garantindo a concepção do sistema como um todo.



Fonte: Autoria Própria.

Todos os sensores e atuadores (4 - 16) são conectados ao hardware desenvolvido (3). Para controle desse hardware é utilizado o sistema embarcado (2). Com este sistema, é possível realizar a leitura dos sensores e apresentar de forma online as informações em página web.

A tabela 2 apresenta a relação dos materiais descritos na figura 5 e sua principal função. Estes materiais foram utilizados para atender as funcionalidades de controle, monitoramento e acionamento do sistema de irrigação proposto neste trabalho. A interface web (1), foi desenvolvida utilizando as linguagens de programação HTML, JavaScript e CSS.

Tabela 2 – Materiais utilizados no desenvolvimento do projeto com suas respectivas funções

Componente	Principal função
Interface web (1)	Apresentar a leitura dos sensores
Raspberry Pi (2)	Processamento de informação
ESP Master (3)	Receber os dados dos módulos de aquisição
Módulos de aquisição de dados (4) e (5)	Receber os dados dos sensores e enviar para a ESP Master
Sensor de fluxo (6)	Controlar fluxo de água
Sensor de temperatura a prova d'água (7)	Monitorar temperatura da água
Sensor de ultrassônico (8)	Monitorar nível da água
Relé de acionamento (9)	Acionar a Bomba de água
Bomba de água (10)	Bombear a água para a irrigação
Sensor de umidade do solo (11)	Monitorar umidade do solo
Sensor de chuva (12)	Monitorar presença de chuva
Sensor LDR (13)	Monitorar luminosidade do ambiente
Sensor DHT11 (14)	Monitorar temperatura e umidade relativa do ar
Sensor de pressão (15)	Monitorar pressão atmosférica

Fonte: Autoria própria.

3.1 Comunicação Wireless

Atualmente existem diversos modelos de dispositivos que auxiliam no desenvolvimento de projetos que tenham como objetivo a comunicação wireless, entretanto, é necessário fazer uma análise completa de custo-benefício para então decidir qual é o modelo mais indicado para a aplicação. A figura 6 apresenta uma visão completa de modelos de dispositivos de comunicação wireless.

Figura 6 – Dispositivos de Comunicação Wireless

Especificações Transmissor						
Comunicação	RF 433Mhz	RF Wireless LoRa	ZigBee	SigFox	NRF24L01	ESP-NOW
Preço	R\$ 12,90	R\$ 119,90	R\$ 287,88	R\$ 62,10*	R\$ 36,90	R\$ 39,90
Modelo	MX-FS-03V	LoRa E32-TTL-100	XBee S2C ZigBee	Wisol SFM11R2DAT	NRF24L01	ESP-32
Alcance	20-200m (conforme tensão)	3km (max)	1,2km (max)	3 - 10km	1km em 250kbps 750m em 1MB 520m em 2MB	200m
Tensão de operação	3,5 - 12V	2.3 - 5.5V	2.1 - 3.6V	2.7 - 3.6V	1.9V - 3.6V	4,5 - 9V
Corrente de emissão	-	130 mA	33 mA	170 mA	115mA	
Modo de operação	AM (Modulação em Amplitude)	LoRa (Similar ao FSK)	ZigBee	Rede WND	GMSK	DSSS
Taxa de transferência	4 KB/s	2.4 Kbps	250 Kbps	1 Kbps	250kbps a 2MB	460kbps
Potência de transmissão	10 mW	100 mW (maxima)	3.1 mW	-	-	
Frequência de operação	433 MHz	433 MHz	2.4 GHz	902.2 MHz	2.4 GHz	2.4 GHz
Dimensões	19 x 19 mm	50 x 21 x 10 mm	27.61 x 24.38 mm	13x20x2,21mm	41x15,2x11mm	52x28x5 mm
Especificações Receptor						
Modelo	MX-05V	LoRa E32-TTL-100	XBee S2C ZigBee	Wisol SFM11R2DAT	NRF24L01	ESP-NOW
Tensão de operação	5 VDC	2.3 a 5.5 VDC	2.1 a 3.6 VDC	2.7 a 3.6 VDC	1.9V - 3.6V	4,5 - 9V
Corrente de operação	4 mA	13.5mA	28 mA	32 mA	12.3mA - 2Mbps	80mA
Sensibilidade	-105 dB	130 dBm @ 1.2 Kbps	-100 dBm / -102 dBm	-129 dBm @600 bps	-95dBm	-98dBm
Dimensões	30x14x17 mm	50 x 21 x 10 mm	27.61 x 24.38 mm	13x20x2,21mm	-	52x28x5 mm

Fonte: Autoria Própria.

Após análise, por ainda ser um projeto acadêmico, foi decidido pelo dispositivo ESP32, que utiliza a comunicação ESP-NOW, isso pois ele tem um custo relativamente baixo, tem um ótimo alcance para uma pequena propriedade, sendo possível também utilizar mais unidades

desse microcontrolador para aumentar o alcance. Devido a esse dispositivo não ser apenas um receptor e transmissor, mas sim um microcontrolador, além de ler os dados dos sensores, também é possível fazer um pré-tratamento dos dados antes de enviá-los para a placa de desenvolvimento, facilitando ainda mais a manipulação dos dados e possibilitando o desenvolvimento de aplicações robustas com baixo investimento monetário e de tempo de desenvolvimento de software.

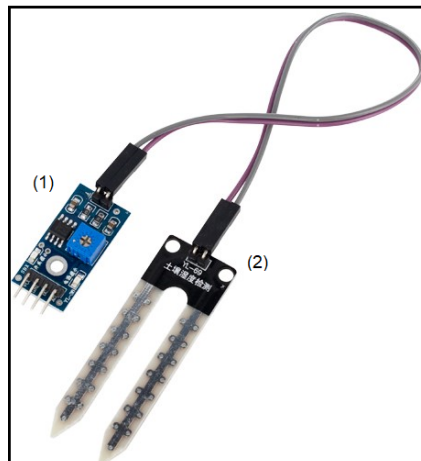
3.2 Placa de Aquisição de Dados

Para fazer a aquisição de dados de maneira wireless foram desenvolvidas duas placas de circuito impresso. Ambas as placas são responsáveis pela integração entre os sensores e o módulo de controle e acionamento do projeto. Nesta seção serão apresentados detalhadamente todos os sensores e módulos utilizados para o desenvolvimento das placas de aquisição de dados.

3.2.1 Sensor de Umidade do Solo

O sensor de umidade do solo, também chamado de Tensiômetro, é utilizado para medir a quantidade de água no solo. Seu funcionamento é baseado no conceito de resistência elétrica, ou resistividade (capacidade de um corpo qualquer se opor à passagem de corrente elétrica). Quanto mais o solo estiver seco, maior será sua resistividade. Quando existe variação de água na superfície, a passagem de corrente elétrica é permitida pela sonda do sensor, produzindo uma diferença de potencial, ou tensão elétrica, e esta é medida pelo módulo do sensor. Assim é possível calcular o quão úmido o solo está: quanto maior a umidade presente no solo, menor será a tensão medida (MURTA, 2019). A figura 7 apresenta o módulo do sensor (1), e a sonda do sensor (2), que é inserida diretamente no solo para realizar a aquisição de dados.

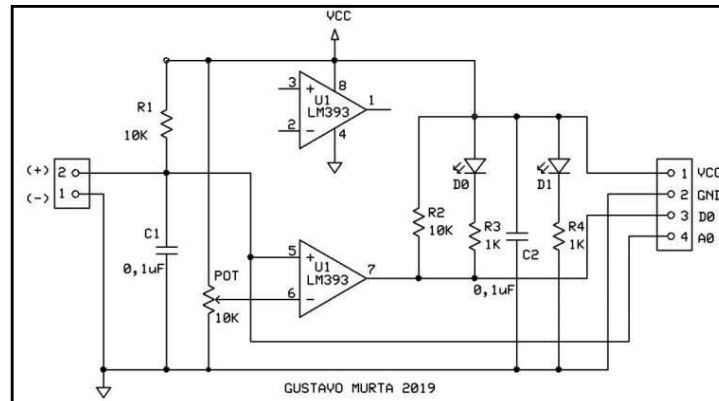
Figura 7 – Sensor de umidade do solo



Fonte: Adaptado de (FILIPEFLOP, 2020).

A figura 8 apresenta o diagrama do módulo do sensor de umidade do solo. São utilizados dois amplificadores operacionais LM393 para comparar os valores de tensão de entrada; e um potenciômetro (Pot) para ajustar a sensibilidade do sensor. A saída (A0) é utilizada para obter as medidas de tensão do sensor (MURTA, 2019). Com o objetivo de obter uma faixa de valores intermediários da variação na umidade do solo, foi utilizada a saída analógica do módulo.

Figura 8 – Módulo comparador do sensor de umidade do solo

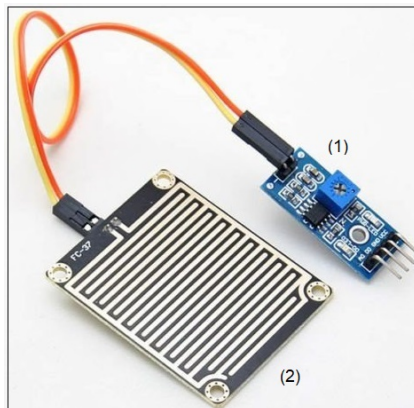


Fonte: (MURTA, 2019).

3.2.2 Sensor de Chuva

A figura 9 apresenta o sensor de chuva, cujo funcionamento é semelhante ao sensor de umidade do solo apresentado anteriormente, e que inclusive utiliza o mesmo módulo comparador. A diferença entre estes sensores está na sonda de captação utilizada: o sensor de chuva possui uma superfície maior, formando uma matriz de linhas para detectar as gotas de água. Neste sensor também foi utilizada a saída analógica do módulo, visando apresentar diferentes intensidades de chuva.

Figura 9 – Sensor de detecção de chuva

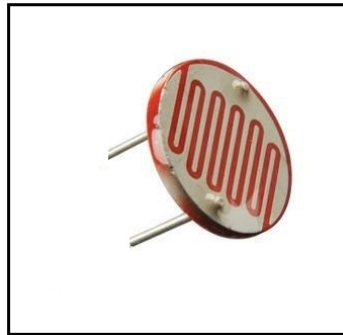


Fonte: Adaptado de (AUTOCORE, 2020).

3.2.3 Sensor de Luminosidade

Com o objetivo de mensurar os dados da intensidade luminosa do ambiente, foi utilizado um sensor LDR (*Light Dependent Resistor*) (figura 10). O funcionamento desse sensor é baseado na mudança de resistência a partir da incidência de partículas de luz (fótons). Em estado normal o material do LDR possui uma alta resistência, por isso quanto maior a incidência de luz sobre o sensor LDR, menor será a sua resistência. Ao escurecer a resistência do LDR é máxima, e se o ambiente estiver claro a sua resistência será muito menor (ALVES, 2019). Sua saída pode ser obtida realizando leituras em um dos terminais. A tabela 3 apresenta as especificações técnicas deste componente.

Figura 10 – Sensor de Luminosidade LDR



Fonte: (MUNDOPROJETADO, 2020).

Tabela 3 – Especificações técnicas sensor LDR

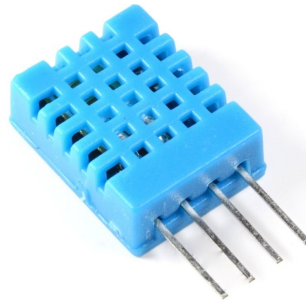
Sensor LDR	
Diâmetro	10mm
Alimentação Máxima	200V
Potência Máxima	560mW
Resistência	5 - 10 k Ω
Resistência no escuro	1M Ω

Fonte: (PHOTORESISTOR, 2016).

3.2.4 Sensor de Temperatura e Umidade relativa

Para desenvolver a aquisição de dados da umidade relativa do ar e temperatura, foi utilizado o sensor DHT11, mostrado na figura 11. O dispositivo é constituído por três partes: um termistor NTC (*Negative Temperature Coefficient*), no qual o aumento da temperatura causa queda da resistência, um sensor resistivo responsável por medir a variação de umidade, e um microcontrolador de 8 bits, utilizado para converter sinais analógicos em digitais (AOSONG, 2016). A tabela 4 apresenta as especificações técnicas do sensor DHT11.

Figura 11 – Sensor de temperatura e umidade relativa do ar DHT11



Fonte: ((FILIFELOP, 2021).

Tabela 4 – Especificações técnicas sensor DHT11

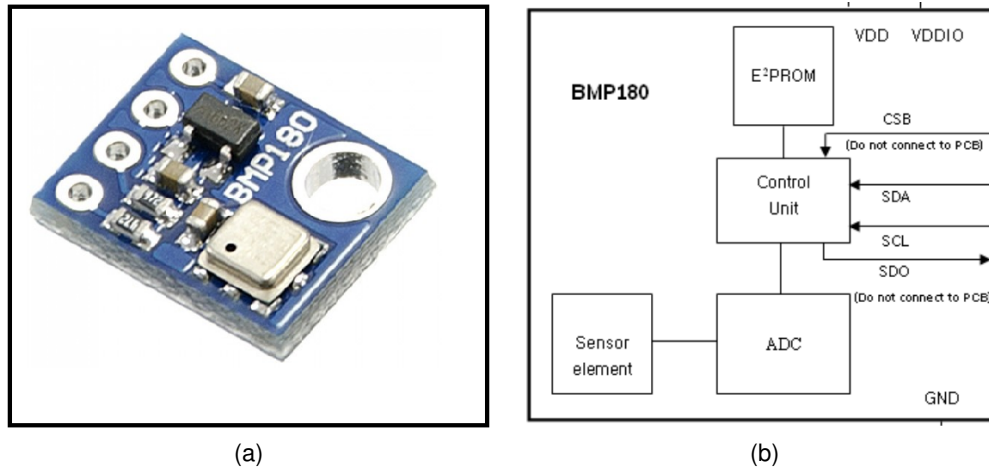
DHT11	
Alimentação	3,5 V a 5,5 v
Corrente em medições	0,3 mA
Intervalo entre medições	>2 s
Faixa de temperatura	0° a 50°
Precisão na Temperatura	+/- 2 °C
Faixa de umidade relativa	20% a 80%
Precisão na umidade	5%

Fonte: (AOSONG, 2016).

3.2.5 Sensor de Pressão Atmosférica

O sensor de pressão atmosférica tem como objetivo fazer a aquisição de dados da pressão exercida pela atmosfera sobre a superfície. O sensor que foi utilizado para essa medição, foi o sensor digital de pressão BMP180 (figura 12 (a)). Sua estrutura eletrônica consiste em um sensor piezo-resistivo, um conversor analógico-digital, uma unidade de controle e uma memória do tipo EEPROM. O módulo se comunica com o microcontrolador usando a interface I2C (*Inter Integrated Circuit*) e também possui sensor de temperatura embutido, saindo de fábrica calibrado. (BMP180, 2013).

Figura 12 – (a) Sensor de Pressão Atmosférica BMP180 (b) Circuito BMP180



Fonte: (a) (ELETROGATE, 2020) (b) (BMP180, 2013).

O BMP180 é baseado em elementos piezo-resistivos (BMP180, 2013). Este dispositivo é capaz de detectar variação de resistência elétrica conforme a deformação e contração da pressão aplicada (BOJORGE, 2013). A figura 12 (b) apresenta o circuito do módulo do sensor, que basicamente mede os valores físicos de pressão e converte estes em sinais digitais por meio do conversor analógico-digital. Posteriormente, esses dados são lidos e processados pela unidade de controle e transmitido por meio do protocolo I2C.

Tabela 5 – Especificações técnicas sensor digital de pressão BMP180

Sensor digital de pressão BMP180	
Alimentação	1.8 à 3.6 V
Consumo de corrente	0.5 uA
Dimensões	13 x 10 mm
Comunicação	I2C
Faixa de Leitura de Pressão	300 à 1100 hPa

Fonte: (BMP180, 2013).

3.2.6 Power Bank

Com o objetivo de eliminar a necessidade de uma fiação elétrica externa para a alimentação dos módulos de aquisição de dados e tornar o projeto totalmente wireless, foi utilizado uma Power Bank em cada módulo de aquisição. Esse dispositivo eletrônico trata-se de uma bateria portátil que é conectada diretamente na entrada de energia da ESP32 de cada módulo de aquisição. Dessa maneira, todos os sensores serão alimentados diretamente do seu respectivo microcontrolador. Por ser um projeto demonstrativo, a power bank atenderia nossa demanda, pois, possui uma capacidade de 5.200 mAh, sendo capaz de alimentar todo o circuito por até uma semana, aproximadamente, sem necessidade de recargas. A tabela 6 apresenta as especificações técnicas da power bank utilizada.

Figura 13 – Power Bank Max



Fonte: (TECHSULELETRÔNICOS, 2020).

Tabela 6 – Especificações técnicas do Power Bank

Power Bank	
Capacidade	5.200 mAh
Bateria	Ions de Lítio
Tempo de atualização	Aproximadamente 750 ms
Entrada de Energia	5 V / 1 A
Saída de Energia	5 V / 2,1 A
Dimensões	8,8 x 4,5 x 2,1 cm
Peso	142 g

Fonte: (TECHSULELETRÔNICOS, 2020).

3.2.7 Sensor de Temperatura para o tanque de água

Foi utilizado o sensor DS18B20 para monitorar a temperatura da água no reservatório (tanque), pois o modelo é capaz de medir a temperatura estando submerso. O sensor fornece de 9 a 12 bits para medições de temperatura, e a comunicação é feita por meio de um barramento de um fio (1-Wire) (TECHSULELETRÔNICOS, 2020). A figura 14 apresenta o sensor DS18B20, revestido por uma sonda de aço inox, juntamente com o cabo coberto por um material flexível.

Figura 14 – Sensor de temperatura DS18B20



Fonte: (TECHSULELETRÔNICOS, 2020).

Os dados provenientes deste sensor podem ser lidos por meio de portas analógicas ou digitais, via protocolo *One-Wire*. A tabela 7 apresenta as especificações técnicas do sensor.

Tabela 7 – Especificações técnicas sensor DS18B20

DS18B20	
Alimentação	3,0 V a 5,5
Consumo de Corrente	0,5 mA
Tempo de atualização	Aproximadamente 750 ms
Faixa de temperatura	-55 a 125 °C
Precisão na Temperatura	+/- 0.5 % °C
Resolução	9 a 12 bits
Diâmetro da sonda	6 mm

Fonte: (TECHSULELETRÔNICOS, 2020).

3.2.8 Sensor de Fluxo de Água

O sensor de fluxo de água é um dispositivo capaz de detectar e medir a vazão de um líquido em uma tubulação. Sendo utilizado o sensor de fluxo YS-201 para este fim, apresentado na figura 15. A sua estrutura interna é formada por uma hélice conectada a um eixo; um sensor de efeito hall magnético; e um ímã. A hélice gira perante a passagem de água, movimentando o ímã em torno do sensor de efeito hall. Movimento este, que causa uma diferença de potencial detectada pelo sensor, de forma a produzir pulsos elétricos sempre que o ímã passa pelo sensor. É possível calcular a vazão do fluxo de água, ao contar a quantidade de pulsos (GARCIA *et al.*, 2017). A tabela 8 apresenta as características técnicas do sensor.

Figura 15 – Sensor de Fluxo de Água

(a) Parte externa



(b) Estrutura interna



Fonte: (a) (ARDUOELETRO, 2020) (b) (YF-201, 2013).

Tabela 8 – Especificações técnicas do sensor de fluxo YF-201

Sensor de fluxo de água YF-S201	
Alimentação	5-24 V
Extensão de erro	+/- 5%
Faixa de fluxo	1-30 L/minuto
Pulsos por litro	450
Faixa de Leitura de Pressão	Frequência (Hz) = 7,5 * Fluxo (L/min)

Fonte: (YF-201, 2013).

3.2.9 Sensor Ultrassônico

O sensor ultrassônico é um dispositivo utilizado para fazer a detecção e determinação da distância de um objeto em relação ao sensor. Para começar a medição é necessário alimentar o módulo e configurar o pino Trigger em nível alto por mais de 10us. Assim, o sensor emitirá uma onda sonora que, ao encontrar um obstáculo, será refletida novamente em direção ao módulo. Durante o tempo de emissão e recebimento do sinal, o pino ECHO ficará em nível alto. Logo, o cálculo da distância pode ser feito de acordo com o tempo em que o pino ECHO permaneceu em nível alto, após o pino Trigger ter sido colocado em nível alto. Este módulo possui um circuito pronto com emissor e receptor acoplados e 4 pinos (VCC, Trigger, ECHO, GND) para medição (THOMSEN, 2011).

Figura 16 – Sensor Ultrassônico HC-SR04



Fonte: (FILIPEFLOP, 2011).

Os dados provenientes deste sensor são lidos através de portas digitais. A tabela abaixo apresenta as especificações técnicas do sensor.

Tabela 9 – Especificações técnicas sensor HC-SR04

HC-SR04	
Alimentação	5V
Consumo de Corrente	15mA
Frequência de operação	40kHz
Distância máxima	4m
Distância mínima	2cm
Ângulo de medição	15°

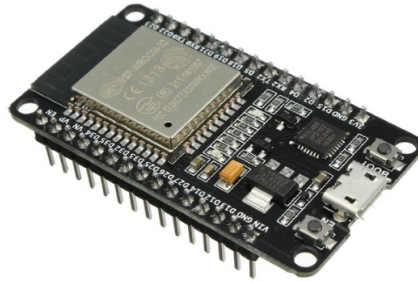
Fonte: (FILIPEFLOP, 2011).

3.2.10 ESP-32

Desenvolvido pela empresa Espressif, o ESP32 trata-se de um microcontrolador com características inovadoras que auxiliam o desenvolvimento de projetos automatizados. Esse dispositivo conta com um módulo de comunicação Wi-Fi, um sistema com processador Dual Core, Bluetooth híbrido, múltiplos sensores embutidos e um protocolo de comunicação ponto a ponto (CURTOCIRCUITO, 2018). Com isso, foi utilizado o microcontrolador ESP32 para realizar a leitura dos dados dos sensores, e enviar os dados de maneira wireless para a unidade de controle.

A figura 17 apresenta o microcontrolador ESP-32. A tabela 10 apresenta as especificações do microcontrolador.

Figura 17 – ESP-32



Fonte: (CURTOCIRCUITO, 2018).

Tabela 10 – Especificações técnicas ESP32

ESP32	
MCU	Xtensa® Dual-Core 32-bit lx6 600 DMIPS
Wifi	HT40
Bluetooth	4.2 Le
Frequência de Operação	160MHz
SRAM	512 Kbytes
Flash	SPI Flash 16Mbytes
GPIO	36
Hardware/ Software PWM	1/16 canais
SPI/I2C/I2S/UART	4/2/2/2
ADC	12-bit
CAN	1
Interface Ethernet Mac	1
Sensor Capacitivo	Sim
Sensor de temperatura	Sim
Temperatura de Operação	-40°C até 125°C

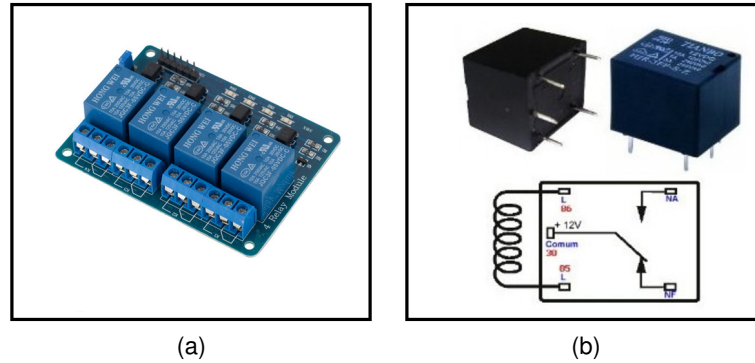
Fonte: (CURTOCIRCUITO, 2018).

3.2.11 Módulo relé de acionamento

O relé trata-se de um aparelho que tem como objetivo atuar como um interruptor eletromagnético para o acionamento de cargas de alta tensão através de um circuito eletrônico de baixa tensão (PATSKO, 2006). O relé é construído internamente por um eletroímã em forma de bobina uma armadura metálica, uma mola e um conjunto de contatos elétricos. No momento em que o circuito é atuado, a corrente elétrica percorre a bobina e produz um campo magnético e então a armadura é atraída pela força eletromagnética, mudando a posição dos contatos para aberto ou fechado. Através da alteração de posição dos contatos do relé, é permitido a

atuação do dispositivo (??). A figura 18 (a) apresenta o módulo relé de quatro canais. A figura 18 (b) apresenta a estrutura interna do relé e o circuito elétrico, composto pela bobina, contatos elétricos e a armadura metálica.

Figura 18 – Relé de acionamento, sendo a) módulo com 4 canais e b) estrutura interna do relé.



Fonte: (a) (FILIPEFLOP, 2019) (b) (LUNICOM, 2019).

Este dispositivo possui saídas digitais, permitindo que um controlador possa realizar acionamentos elétricos para atuar em uma bomba de sucção. A tabela 11 apresenta as especificações técnicas do módulo.

Tabela 11 – Especificações técnicas do módulo SRD-05VDC-SL-C

Módulo Relé SRD-05VDC-SL-C	
Alimentação	5 V
Corrente	15-20 mA
Saída	Digital
Tensão de carga controlada	até 220 V AC
Tempo de resposta	5 - 10 ms
Quantidade de Canais	4

Fonte: (FILIPEFLOP, 2019).

3.3 Placas de Desenvolvimento

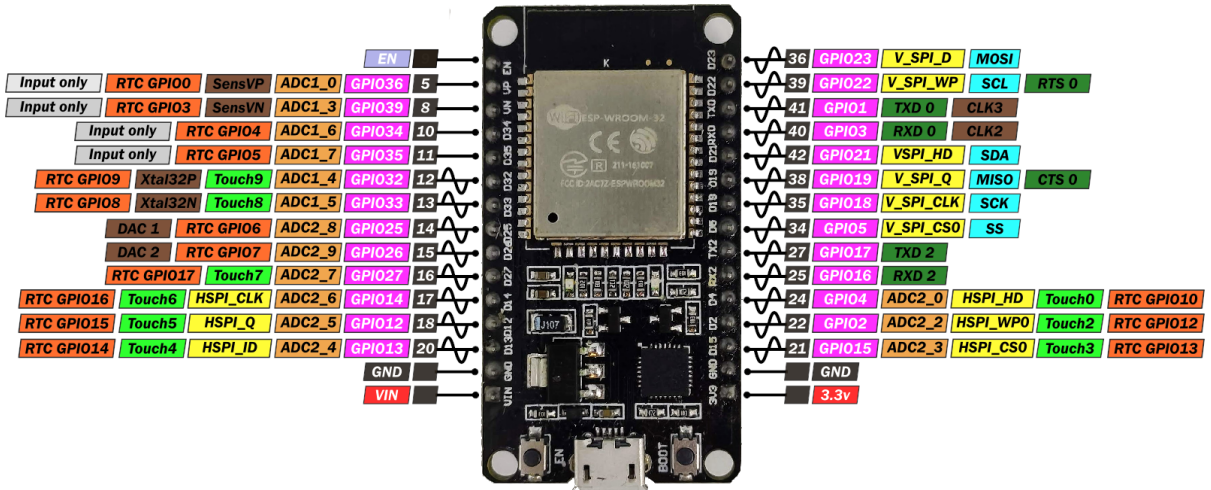
Para desenvolver o tratamento de dados obtidos pela placa de aquisição, com o microcontrolador ESP32, como também fazer a execução de acionamentos, foi utilizado a plataforma Raspberry Pi. Este dispositivo permite a integração entre sensores, periféricos e também possui um sistema operacional, facilitando o gerenciamento de recursos e desenvolvimento de aplicações.

3.3.1 GPIO

As GPIO's (*General Purpose Input/Output*) são periféricos de entrada e saída para uso geral de microcontroladores como a Raspberry Pi e a ESP32. Por serem pinos programáveis em um circuito integrado, as GPIOs não têm funcionalidade predefinida e o comportamento delas pode ser personalizado por um aplicativo. Alguns usos comuns das GPIOs são controle de

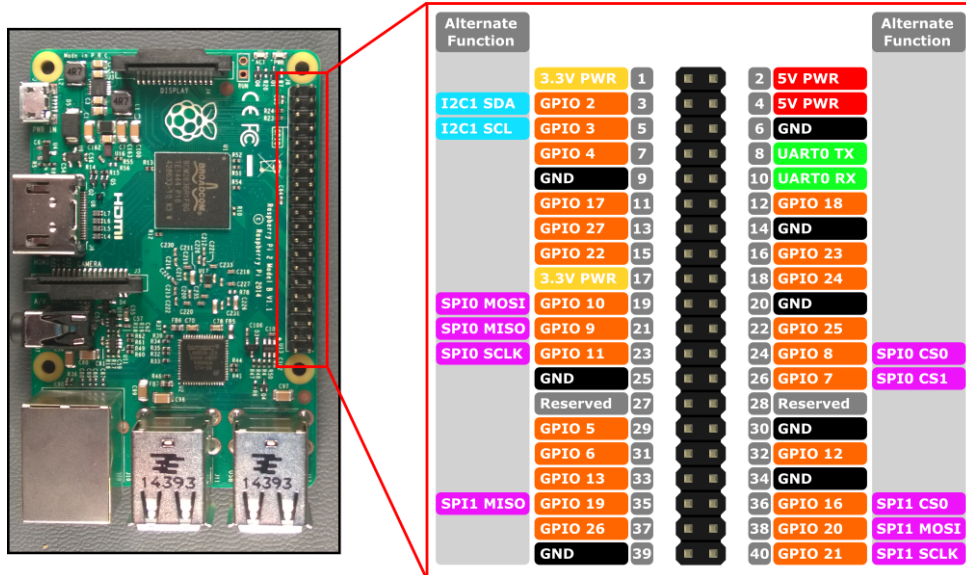
LEDs, modulação por largura de pulso (PWM), *Inter Integrated Circuit* (I2C), *Serial Peripheral Interface* (SPI), serial RS232 entre outras funcionalidades. As figuras 19 e 20 apresentam o mapeamento das GPIO's do Raspberry Pi e ESP32.

Figura 19 – Mapeamento dos pinos no DevKit DOIT ESP32



Fonte: (MISCHIANTI, 2021).

Figura 20 – Mapeamento das GPIO's no Raspberry Pi 3B



Fonte: (IOT, 2022).

3.4 Software

3.4.1 Protocolo ESP-NOW

O ESP-NOW é um protocolo desenvolvido pela empresa chinesa Espressif Sistemas, e permite que vários dispositivos se comuniquem entre si sem utilizar a rede Wi-Fi padrão. O

ESP-NOW permite aquisição de dados e um controle direto e de baixa latência, podendo controlar diversos dispositivos inteligentes de maneira remota, sem a necessidade de conexão com um roteador. Este método é eficiente em termos de economia de energia e conveniente para ser utilizado em dispositivos que trabalhe com pilhas ou baterias. O protocolo é semelhante à conectividade sem fio de baixa potência de 2,4 GHz que é frequentemente implantada em mouses e teclados sem fio. Para que seja possível sua utilização, é necessário o emparelhamento entre dispositivos antes de sua comunicação. Após o emparelhamento, a conexão é segura e ponto-a-ponto, sem necessidade de uma rede de apoio (MARQUES, 2020).

O protocolo ESP-NOW pode ser utilizado com 4 diferentes topologias de comunicação: One-way communication, One master - Multiple slaves, One slave - multiple masters e Two-way communication.

A topologia one-way é ideal para aplicações onde o objetivo é controlar acionamentos de uma única placa distante através de uma placa mestre.

Figura 21 – One-way Communication



Fonte: (RANDOMNERDTUTORIALS, 2020).

A topologia Multiple master é ideal para aplicações onde o objetivo é adquirir dados através de diversas placas e enviar para uma placa central. Essa foi a topologia utilizado no projeto devido à grande facilidade em receber dados e executar um pré-processamento de diversos sensores antes de enviar para a placa central.

Figura 22 – Multiple master Communication



Fonte: (RANDOMNERDTUTORIALS, 2020).

A topologia Multiple slave é similar a topologia one-way; entretanto, ela utiliza diversos microcontroladores. Essa topologia é indicada para aplicações onde o objetivo é controlar acionamentos de diversas placas através de uma placa mestre. Um exemplo de aplicação seria

o desenvolvimento de um controle remoto, onde apenas uma placa é responsável por enviar comandos a diversos microcontroladores escravos.

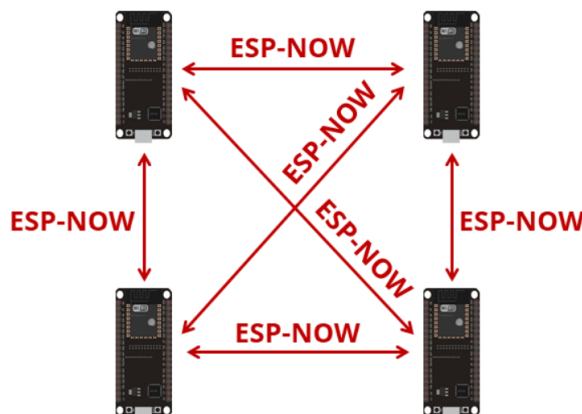
Figura 23 – Multiple slave Communication



Fonte: (RANDOMNERDTUTORIALS, 2020).

A topologia Two-way é utilizada em aplicações onde é necessário criar uma rede de dados descentralizada, pois todos os microcontroladores se comunicam e podem enviar ou receber dados para toda a rede de microcontroladores. Essa topologia também poderia ser utilizada no projeto com o objetivo de aumentar o alcance dos sensores sem a necessidade de alterar a antena dos microcontroladores.

Figura 24 – Two-way Communication



Fonte: (RANDOMNERDTUTORIALS, 2020).

O protocolo ESP-NOW possui as seguintes especificações técnicas:

- Comunicação unicast criptografada e não criptografada;
- Dispositivos pares criptografados e não criptografados mistos;
- A carga útil de dados é limitada a 250 bytes;
- Função de retorno de chamada de envio que pode ser configurada para informar a camada de aplicação do sucesso ou falha da transmissão;
- Limitação de 10 pontos criptografados no modo estação;

- Limitação de 6 pontos em modo softAP ou softAP + estação;
- Limitação de 20 pontos totais incluindo pontos não criptografados;

3.4.1.1 Particularidades ESP-NOW

O projeto tem como objetivo desenvolver uma comunicação entre sensores e microcontroladores sem utilizar comunicação cabeada e sem acesso a internet. Para isso utilizaremos o protocolo MQTT em conjunto com o protocolo ESP-NOW. Entretanto, a comunicação ESP-NOW utiliza o módulo de comunicação Wi-Fi para envio dos dados. Logo, a aquisição de dados utilizando o conversor ADC2 e o acesso à rede privada feita para a comunicação MQTT entre ESP32 master e a Raspberry se torna impossível de ser executada ao mesmo tempo, pois ambos compartilham as mesmas portas. Além disso, as leituras do ADC1 também ficam ruidosas durante o uso do WiFi.

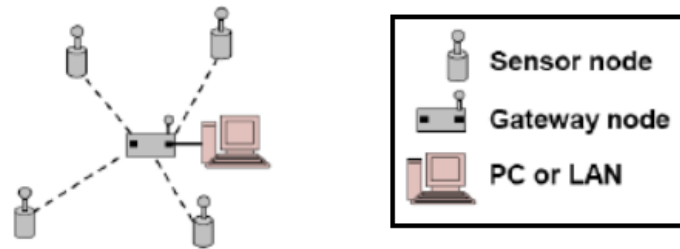
Para resolver essa peculiaridade de hardware, a ESP32 master será dedicada apenas à recepção e envio de dados, evitando assim os problemas de aquisição de dados. Com o propósito de efetuar ambos os métodos de comunicação na ESP32 master (MQTT e ESP-NOW), alteramos a configuração base de comunicação do microcontrolador para funcionar como SoftAP + Estação wifi (`WiFi.mode(WIFI_AP_STA)`). Além dessa alteração de código base, adicionamos um sleep no código para que o Wi-Fi seja acionado apenas a cada dois minutos; dessa maneira, a comunicação ESP-NOW funciona durante dois minutos armazenando os dados, e o envio de dados para o MQTT é feito quando o sleep de Wi-Fi acaba, pois o Wi-Fi é prioritário sobre o ESP-NOW.

3.4.2 Topologia de rede

Uma rede de sensores sem fio pode ser definida como uma rede sem fio de dispositivos autônomos que contêm sensores, distribuídos espacialmente para monitorar fenômenos físicos ou ambientais. Os sensores (chamados de nós) podem ser posicionados em diversas distâncias do fenômeno que está sendo medido, o que não é possível com redes de sensores tradicionais. Os nós podem se comunicar entre si por meio de uma rede ad-hoc sem fio, sem a necessidade de uma estação base, ou diretamente a um gateway (RIOS; ASSIS; SOARES, 2018).

Para esse projeto foi utilizado a topologia de rede estrela. Devido o projeto ser apenas para uma aplicação universitária, não são utilizados grandes quantidades de sensores como em uma aplicação industrial. Logo, a topologia estrela é a mais indicada, na qual cada nó transmite o sinal diretamente para uma central de recepção. Além disso, ela possui um bom custo-benefício pelo fato dos sensores apenas transmitirem os dados (sem receptor). Entretanto, sua limitação é a distância que a rede pode alcançar, limitada pelo fato de que todos os nós precisam estar no alcance da central de recepção.

Figura 25 – Topologia de rede estrela



Fonte: Adaptado de (RIOS; ASSIS; SOARES, 2018).

3.4.3 MQTT

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) é um protocolo de comunicação *Machine to Machine* (M2M) com foco em *Internet of Thing* (IoT) que funciona em cima do protocolo TCP/IP. Um sistema MQTT se baseia na comunicação entre cliente e servidor, em que o primeiro pode realizar tanto “postagens” quanto “captação” de informação e o segundo administra os dados a serem recebidos e enviados. Para que a comunicação seja possível, é necessário um *Broker* e um *Client*.

O *Broker* é o servidor intermediário da informação. É ele quem recebe os dados dos sensores enviados pela ESP32 e é nele que os dados são tratados e passados adiante para a *Dashboard*. O *Client* possui duas áreas de atuação sobre os dados: *Publish* e *Subscriber*. Ele pode escolher em qual área atuar, sendo possível trabalhar na *Postagem*, no *Recebimento* ou nos dois ao mesmo tempo. Mas independente de qual caso ele escolha, sempre será necessária a presença de um *Broker* para realizar a intermediação dos dados entre todos os *clients* (NERI; LOMBA; BULHÕES, 2019). A figura 26 apresenta a recepção dos dados de porcentagem de luminosidade, que foram enviados pela ESP32 master via protocolo MQTT.

O NGINX foi o servidor web utilizado para o desenvolvimento desse projeto, pois, além de atender as especificações técnicas do projeto e fornecer os recursos de comunicação necessários para executar as funcionalidades proposta, ele demanda um baixo uso de memória, além de uma alta compatibilidade com aplicativos da web comumente usados, como WordPress, Ruby, Python, Joomla entre outros, facilitando o desenvolvimento de páginas web (EVEO, 2019).

3.4.6 Python

O Python é uma linguagem de programação orientada a objetos que permite o desenvolvimento de scripts para automatizar tarefas em diversas plataformas e programas, possibilitando também a criação de diversos sistemas computacionais(BORGES, 2006). Essa é a linguagem nativa para a elaboração de rotinas de escrita e leitura das GPIO's da Raspberry utilizada no desenvolvimento do projeto.

3.4.7 HTML

HTML é a linguagem de marcação utilizada para descrever a estrutura básica de um site ou página web, devido a sua grande flexibilidade para interligar outros documentos dentro do mesmo site, ou conteúdos externos por meio de links (SILVA, 2006). O HTML possibilita criar páginas web e inserir imagens, links externos, botões, caixas de texto e outros componentes que compõem seu sistema web.

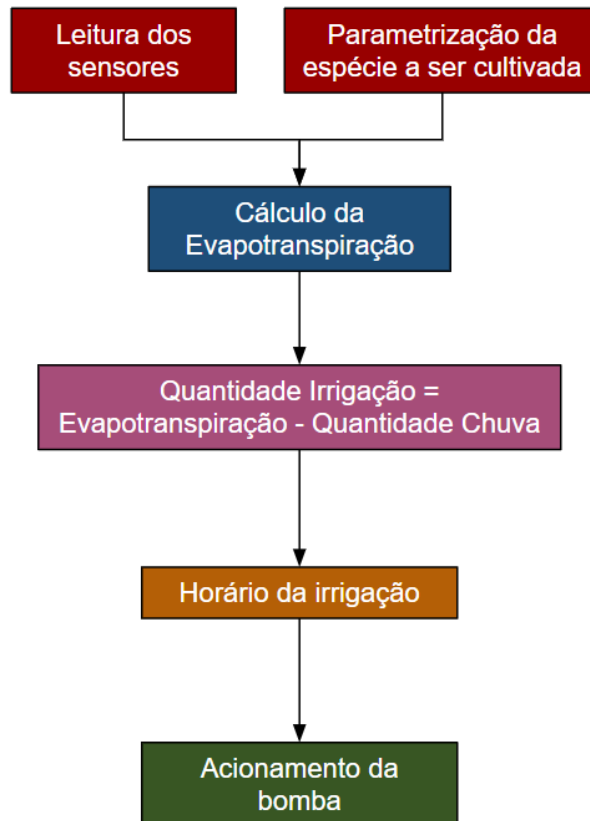
3.4.8 CSS

O *Cascading Style Sheets* (CSS) é uma linguagem de estilo usada para descrever a aparência e o formato de páginas escritas em HTML (SILVA, 2006). A principal função do CSS é personalizar os componentes de sua página da web.

4 MÉTODOS

Esse capítulo tem como objetivo apresentar a metodologia utilizada para o desenvolvimento de toda a parte prática do projeto. A figura 28 apresenta o fluxograma utilizado para desenvolver todo o protótipo, sendo apresentado desde os blocos de aquisição dos dados, até ao acionamento do sistema de irrigação.

Figura 28 – Fluxograma das etapas da metodologia adotada



Fonte: Autoria própria.

Para garantir maior precisão no cálculo da quantidade de água e do melhor momento a ser feita a irrigação serão feitas aquisições de dados de todos os sensores periodicamente; ou seja, a cada 1 hora será feito um novo loop de aquisição de dados em um período total de 24 horas. Após executadas as aquisições será feita uma média dos resultados obtidos, para então calcular a evapotranspiração de referência.

Para que seja possível calcular o valor efetivo da evapotranspiração, também é necessário receber através do usuário do sistema, qual será a cultura que vai ser cultivada, para então parametrizar o sistema com o coeficiente da cultura desejada, sendo que cada espécie possui um coeficiente diferente, devido as suas características específicas.

Com todos os dados já adquiridos, é feito o cálculo da quantidade de água (mm/dia) a ser utilizada para a irrigação, sendo o valor calculado anteriormente da evapotranspiração da cultura, subtraído da quantidade de chuva do mesmo período. A tabela 12 apresenta todas as

variáveis utilizadas no projeto, suas respectivas unidades de medida e o sensor utilizado para coletar a respectiva informação.

Tabela 12 – Variáveis utilizadas no controle e monitoramento do sistema

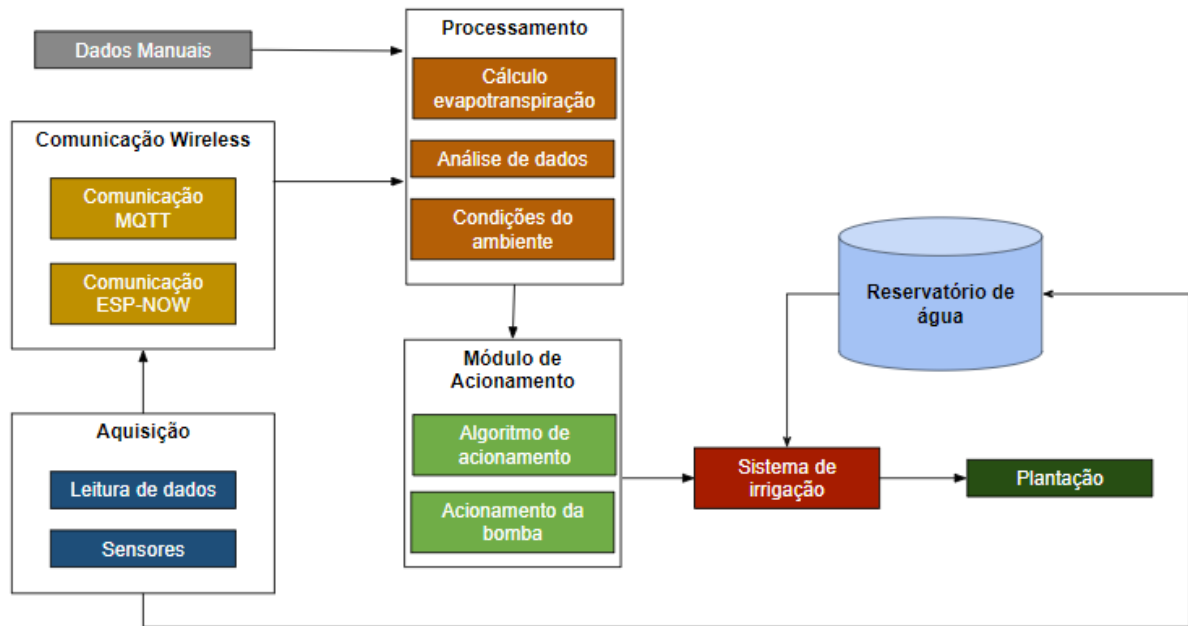
Grandeza	Unidade de medida	Componente utilizado
Temperatura do ambiente	°C	Sensor DHT22
Umidade relativa do ar	% (Porcentagem)	Sensor DHT22
Pressão atmosférica	Pa	Sensor BMP180
Altitude	m	Inserção manual
Latitude	graus (°)	Inserção manual
Luminosidade	% (Porcentagem)	Sensor LDR
Umidade do solo	% (Porcentagem)	Sensor de umidade do solo
Fluxo de água	L/m	Sensor de fluxo
Coeficiente de cultura	-	Inserção manual

Fonte: Autoria própria.

4.1 Desenvolvimento

Com o objetivo de contemplar todos os passos citados na metodologia descrita no tópico anterior, dividimos o projeto em 5 etapas: aquisição de dados dos sensores, comunicação wireless ESP32 *Slave* - ESP32 *Master*, comunicação MQTT, cálculo de evapotranspiração e por fim, algoritmo de acionamento da bomba de irrigação. A aquisição consiste em fazer a leitura dos dados do sensor em uma respectiva ESP32 *Slave* e executar um pré-tratamento do dado. A comunicação entre *Slave* e *Master*, consiste em desenvolver uma comunicação entre microcontroladores utilizando o protocolo ESP-NOW e uma topologia de rede estrela. Para viabilizar o desenvolvimento de um projeto totalmente wireless, será utilizado o protocolo MQTT, que fará a comunicação entre a ESP32 *Master* e a placa de desenvolvimento. O cálculo da evapotranspiração consiste em aplicar as equações a partir dos dados enviados para a placa de desenvolvimento e também os dados inseridos manualmente, para estimar a quantidade de água que deve ser irrigada. Por fim, o algoritmo de acionamento analisa as condições do ambiente externo e determina quando o sistema de irrigação será acionado. A figura 29 apresenta o diagrama de blocos do projeto.

Figura 29 – Arquitetura do projeto

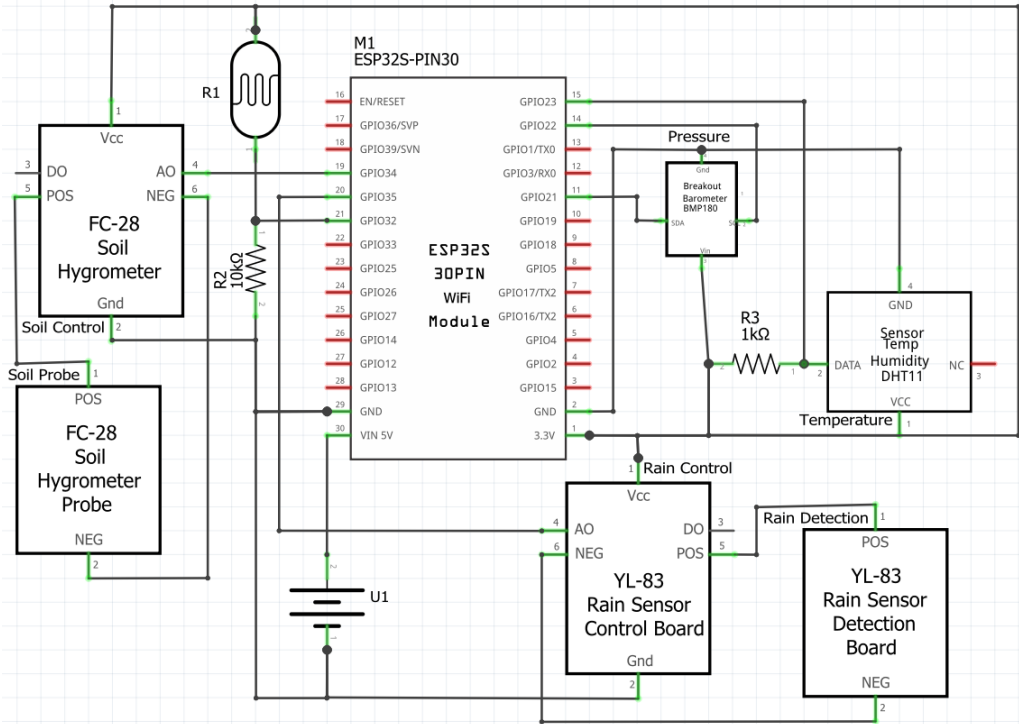


Fonte: Autoria própria.

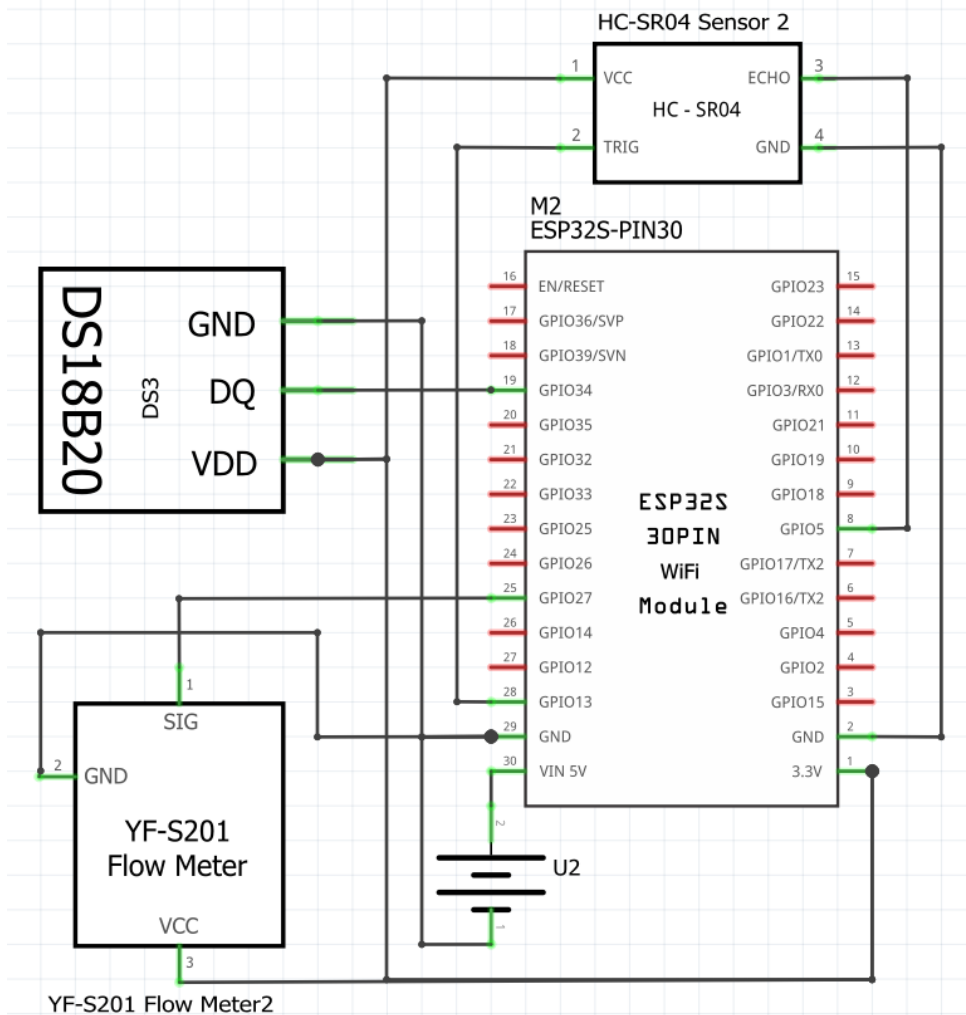
4.1.1 Placa de aquisição de dados

Para conectar os sensores e módulos foram projetadas duas placas de aquisição de dados, uma para os sensores de campo, e outra para os sensores do reservatório. As placas fornecem energia para os componentes e permitem a integração com a plataforma ESP-NOW. As figuras 30a e 30b apresentam os diagramas esquemáticos das placas de aquisição de dados.

Figura 30 – Diagrama esquemático da placa de aquisição de dados
(a) Sensores de campo



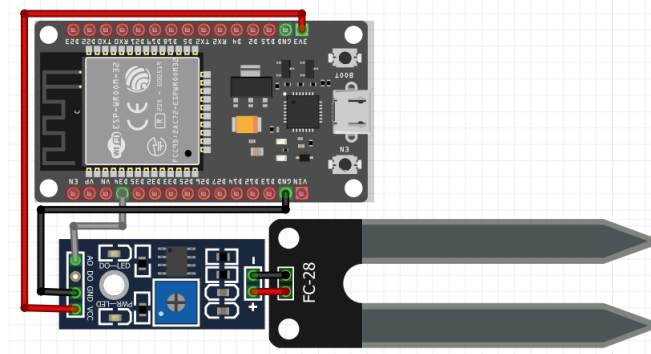
(b) Sensores do reservatório



4.1.2 Leitura do sensor de umidade de solo

A figura 31 apresenta a montagem do sensor de umidade de solo, no circuito da placa de aquisição de dados. O componente possui quatro pinos: A0, D0, GND e VCC. O pino A0 trata das leituras do sensor por meio de um sinal analógico; o pino D0 trata das leitura do sensor por meio de um sinal digital; o pino GND trata do aterramento do sensor (ponto comum de todo o circuito); e o pino VCC trata da alimentação do sensor.

Figura 31 – Montagem do sensor umidade do solo



Fonte: Autoria própria.

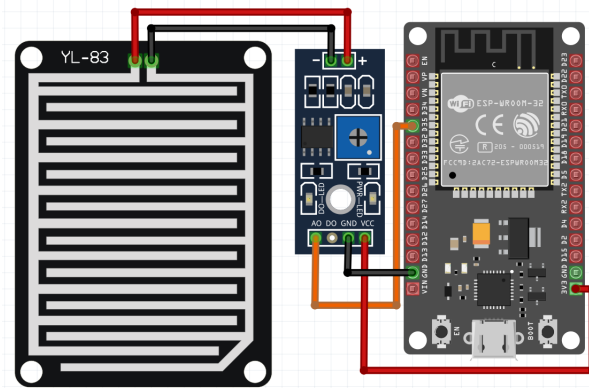
Baseado nas características e funcionalidades do sensor de umidade do solo descritas no capítulo de materiais foi desenvolvida uma função em C para adquirir os dados de leitura do sensor. As leituras variam de 0 a 1, sendo 0 sem contato com umidade e 1 completamente úmido. A equação 3 descreve a umidade detectada pelo sensor em porcentagem.

$$umidadeSolo = (1 - leituraSensor)100 \quad (3)$$

4.1.3 Leitura do sensor de detecção de água

A montagem do sensor de detecção de chuva é semelhante à utilizada para o sensor de umidade do solo, e é mostrado na Figura 32). A leitura deste sensor consiste em verificar se os valores lidos são maiores que 0. As leituras variam entre 0 e 1, onde 0 indica que o que a sonda do sensor não identificou presença de chuva e 1 indica que o sensor detectou chuva na sua superfície.

Figura 32 – Montagem do sensor de chuva

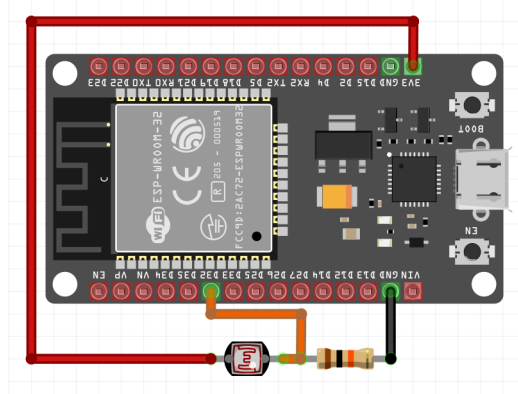


Fonte: Autoria própria.

4.1.4 Leitura do sensor de luminosidade LDR

A figura 33 apresenta as conexões do LDR. O componente possui dois terminais, um é ligado ao ponto de alimentação e outro é ligado a um resistor de 10 k Ω , possibilitando a medição da variação de tensão no sensor. O resistor é interligado no ponto comum do circuito. A figura 33 apresenta a montagem do sensor no circuito.

Figura 33 – Montagem do sensor Luminosidade



Fonte: Autoria própria.

Para realizar as leituras do LRD foi implementado uma função em C que realiza leituras na placa de desenvolvimento ESP e realiza a conversão em porcentagem. A equação 4 descreve os valores lidos em porcentagem de luminosidade.

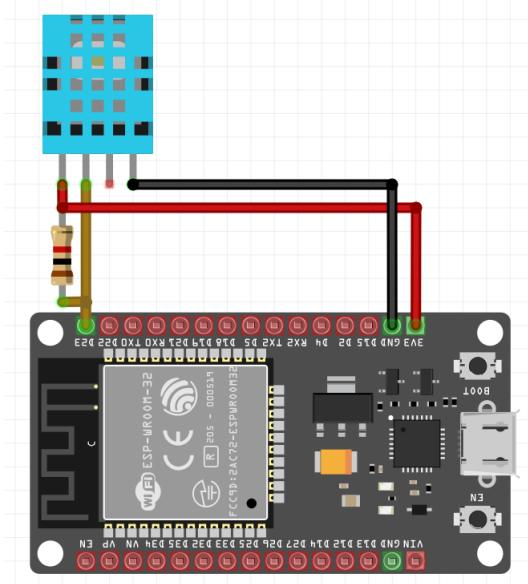
$$luminosidade = (1 - leituraSensor)100 \quad (4)$$

4.1.5 Leitura do sensor de Temperatura e Umidade relativa do ar

A figura 34 apresenta a montagem do sensor DHT11 no circuito. O componente é ligado a GPIO23 da placa de desenvolvimento ESP32, juntamente com um resistor de *pull up* de 1

k Ω . O pino 1 (Vcc) é referente a alimentação do sensor; o pino 2 (Data) realiza as leituras do sensor; o pino 3 (NC) não é conectado; e o pino 4 (Gnd) é ligado ao ponto comum do circuito.

Figura 34 – Montagem do sensor temperatura e umidade do ar

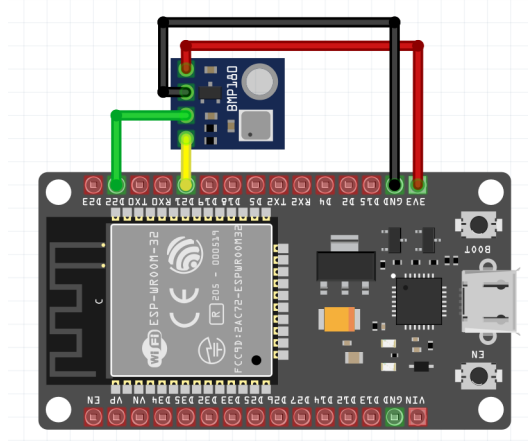


Fonte: Autoria própria.

4.1.6 Leitura do sensor de Pressão Atmosférica

A figura 35 apresenta a montagem do sensor BMP180 no circuito. O componente é ligado a GPIO21 (SDA) e GPIO22 (SCL) da placa de desenvolvimento ESP32. O componente possui 4 terminais: o terminal 1 (SDA) refere-se à comunicação com a ESP32; o terminal 2 (SCL) fornece o sinal de clock para a comunicação entre o sensor e sistema embarcado; o terminal 3 é a alimentação do sensor; e o terminal 4 é o comum. A comunicação deste sensor é baseada no protocolo de comunicação I2C (TOWNSEND, 2012).

Figura 35 – Montagem do sensor de Pressão Atmosférica

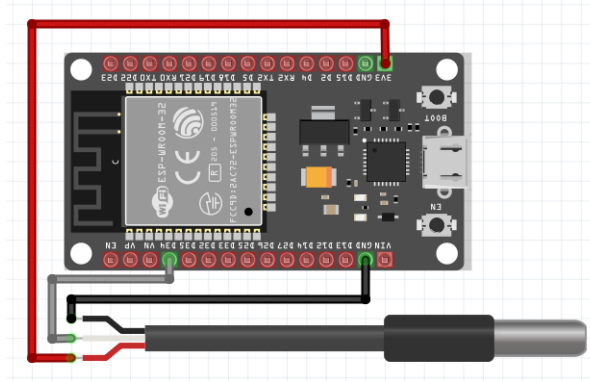


Fonte: Autoria própria.

4.1.7 Leitura do sensor de Temperatura para o tanque de água

A figura 36 apresenta a montagem do circuito para medir a temperatura da água do reservatório com o sensor DS18B20. O sensor é conectado a GPIO34 da placa de desenvolvimento ESP32. O sensor possui três pinos: o pino 1 refere-se à leitura do sensor; o pino 2 é o comum; e o pino 3 é a alimentação do sensor. Para realizar as leituras de temperatura do sensor foi implementada uma função em C.

Figura 36 – Montagem do sensor de Temperatura para o tanque de água

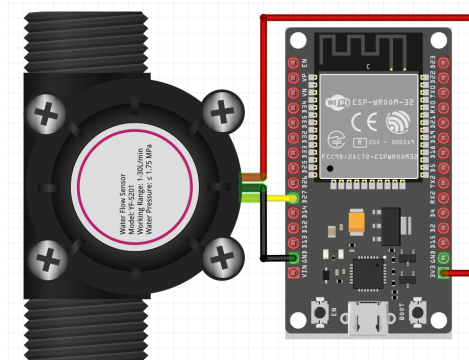


Fonte: Autoria própria.

4.1.8 Leitura do sensor de Fluxo de água

A figura 37 apresenta a montagem do circuito para medir o fluxo de água do reservatório com o sensor YF-S201. O sensor é conectado a GPIO27 da placa de desenvolvimento ESP32. A leitura do sensor é feita por meio da contagem de pulsos em um intervalo de tempo de 1 segundo. A cada 60 segundos é feito o cálculo da vazão da água por minuto.

Figura 37 – Montagem do sensor de Fluxo de água

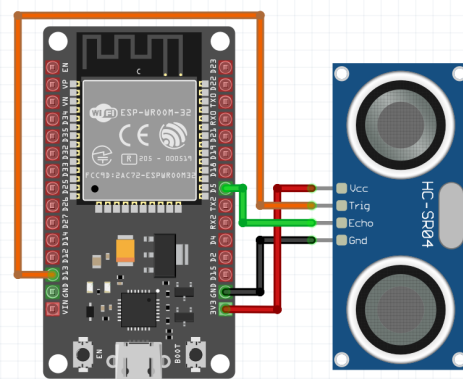


Fonte: Autoria própria.

4.1.9 Leitura de Nível

A figura 38 apresenta a montagem do circuito para fazer a aquisição do nível de água do reservatório com o sensor HC-SR04. O sensor é conectado através de quatro pinos na placa de aquisição de dados ESP32: GND, VCC, Trigger (GPIO 13) e Echo (GPIO 5). A cada loop do código um script faz a aquisição de dados da onda ultrassônica, enviada pelo sensor e com base no tempo de retorno, calcula a distância do sensor em relação ao nível da água no reservatório.

Figura 38 – Montagem do sensor de Nível

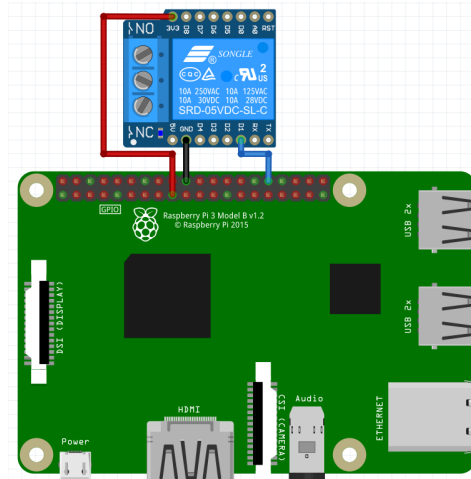


Fonte: Autoria própria.

4.1.10 Controle do Módulo Relé

Para controlar o sistema de irrigação (Bomba hidráulica) foi utilizado um relé eletrônico. O controle do módulo relé é realizado por meio da GPIO12 do Raspberry Pi. O acionamento e desligamento do canal do módulo é feito através de um script implementado em Python. A figura 39 apresenta a montagem do circuito para a integração do módulo relé com a Raspberry Pi.

Figura 39 – Montagem do Módulo Relé

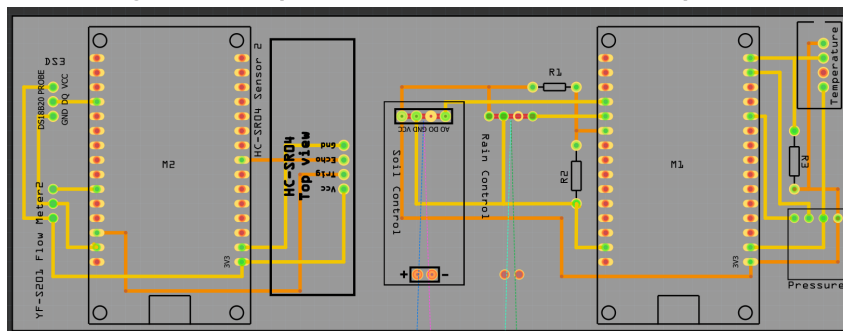


Fonte: Autoria própria.

4.1.11 Construção da placa de circuito impresso

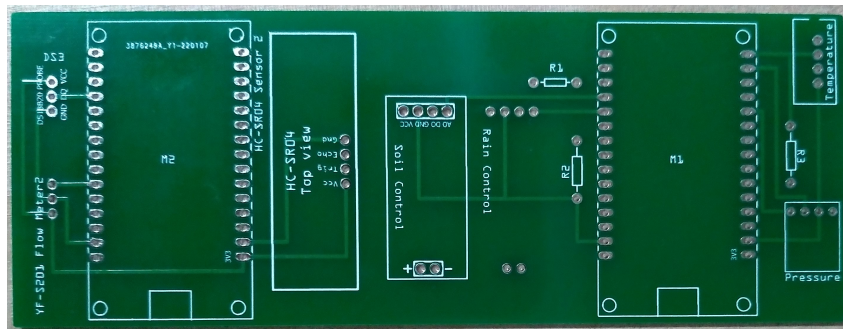
A etapa de desenvolvimento da placa de circuito impresso completo, foi dividida em duas etapas: prototipação com *protoboard* e prototipação na placa de circuito impresso. A primeira etapa da construção consistiu em executar a montagem dos componentes em uma *protoboard* e interligar os pontos do circuito, utilizando fios condutores. Esta etapa teve como objetivo validar as ligações projetadas e realizar ajustes e calibração dos componentes utilizados. A segunda consistiu em projetar o roteamento das trilhas dos componentes e montar a placa de circuito impresso. A figura 40 apresenta o esquemático da placa de ambas as placas de aquisição de dados e a figura 41 apresenta ambas as placas fabricadas.

Figura 40 – Esquemático das Placas de circuito impresso



Fonte: Autoria própria.

Figura 41 – Montagem das Placas de circuito impresso



Fonte: Autoria própria.

4.1.12 Roteiro do cálculo da evapotranspiração

Nesta seção serão demonstrados os cálculos para cada variável da equação da evapotranspiração de referência (ET_o) proposta pelo método de Penman-Monteith-FAO, utilizando o roteiro de cálculo descrito por Fonseca (FONSECA, 2006).

A equação 5 rege o método de Penman-Monteith-FAO:

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T_2 + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (5)$$

Os valores diários do fluxo de calor no solo (G) normalmente são baixos, e podem ser desconsiderados quando não há medições de G disponíveis (FONSECA, 2006).

A declividade da curva de pressão de vapor em relação à temperatura pode ser determinada utilizando a equação 6. A variável "T", presente na equação, corresponde à temperatura do ar em °C (FONSECA, 2006), e é obtida por meio da leitura do sensor DHT11.

$$\Delta = \frac{4098[0,6108e^{\left(\frac{17,27T}{T+237,3}\right)}]}{(T + 237,3)^2} \quad (6)$$

A constante psicrométrica é calculada por meio da equação 7. A variável P_{atm} corresponde à pressão atmosférica local (FONSECA, 2006), e é obtida por meio do sensor BMP180.

$$\gamma = 0,66510^{-3} P_{atm} \quad (7)$$

A pressão de saturação de vapor pode ser obtida por meio da equação 8. A variável "T" corresponde à temperatura do ar em °C (FONSECA, 2006), e é obtida por meio da leitura do sensor DHT11.

$$e_s = 0,6108e^{\left[\frac{17,27T}{T+237,5}\right]} \quad (8)$$

A pressão atual de vapor do ar pode ser determinada utilizando a equação 9. A variável UR corresponde à umidade relativa do ar (FONSECA, 2006), e é obtida por meio da leitura do sensor DHT11.

$$e_a = \frac{e_s UR}{100} \quad (9)$$

Esta variável também pode ser obtida com os valores de temperatura mínima diária, utilizando a equação 10 (FONSECA, 2006). Os dados de temperatura mínima podem ser obtidos através de consulta no histórico diário de temperaturas adquiridas pelo sensor DHT11.

$$e_a = 0,6108e^{\left[\frac{17,27T_{min}}{T_{min}+237,3}\right]} \quad (10)$$

O saldo de radiação (R_n) estimado é calculado pela diferença entre o saldo de radiação de ondas curtas e o saldo de radiação de ondas longas. Esta variável é apresentada na unidade de medida ($MJm^{-2}dia^{-1}$). A equação 11 descreve o cálculo acima (FONSECA, 2006).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (11)$$

A radiação de ondas curtas (R_{ns}) pode ser determinado pela equação 12, na qual R_s trata-se da radiação solar incidente, e α representa o coeficiente de reflexão da vegetação, considerado 0,23 (FONSECA, 2006).

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (12)$$

A radiação solar incidente (R_s) é calculada utilizando os dados de temperatura diária máxima e mínima, através da equação 13. O valor de k_{R_s} é 0,16 para regiões continentais e 0,19 para regiões costeiras (FONSECA, 2006).

$$R_s = k_{R_s}R_a\sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (13)$$

O saldo da radiação de ondas longas pode ser obtido por meio da equação 14, sendo que T_{max} é a temperatura máxima diária; T_{min} é a temperatura mínima diária; e σ é a constante de Stefan-Boltzmann, $4,9003 \cdot 10^{-9} \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$; R_{so} é a radiação solar incidente na ausência de nuvens $\text{MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$; e e_a é a pressão atual de vapor (kPa) (FONSECA, 2006).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{(T_{max} + 273,16)^4 + (T_{min} + 273,16)^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) (1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35) \quad (14)$$

A radiação solar incidente na ausência de nuvens pode ser calculada por meio da equação 15. A variável "z" é a altitude local em relação ao nível do mar medido em metros (m) (FONSECA, 2006).

$$R_{so} = (0,75 + 2 * 10^{-5}z)R_a \quad (15)$$

" R_a " é a radiação no topo da atmosférica, e pode ser obtida através da equação 16. O valor de " φ " representa a latitude local medida em radianos (FONSECA, 2006).

$$R_a = \frac{118,08}{\pi} dr [\omega_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \text{cos}(\varphi) \text{cos}(\delta) \text{sen}(\omega_s)] \quad (16)$$

O valor de " dr " representa a distância inversa relativa entre a Terra e o Sol, medida em radianos. Este pode ser calculado por meio da equação 17, na qual " J " representa o dia do ano de 1 a 365, ou 366 para ano bissexto (FONSECA, 2006).

$$dr = 1 + 0,033 \text{cos}(\frac{2\pi}{365}J) \quad (17)$$

O valor de " δ " representa a declinação solar medida em radianos e pode ser calculada por meio da equação 18 (FONSECA, 2006).

$$\delta = 0,409 \text{sen}(\frac{2\pi}{365}J - 1,39) \quad (18)$$

O valor de " ω " é o ângulo horário ao nascer do sol medido em radianos e pode ser calculado por meio da equação 19; e a variável " X " pode ser calculada com a equação 20. Caso o valor de " X " for menor ou igual a 0, então " X " assume o valor de 0,00001 (FONSECA, 2006).

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left[\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{X^{0,5}}\right] \quad (19)$$

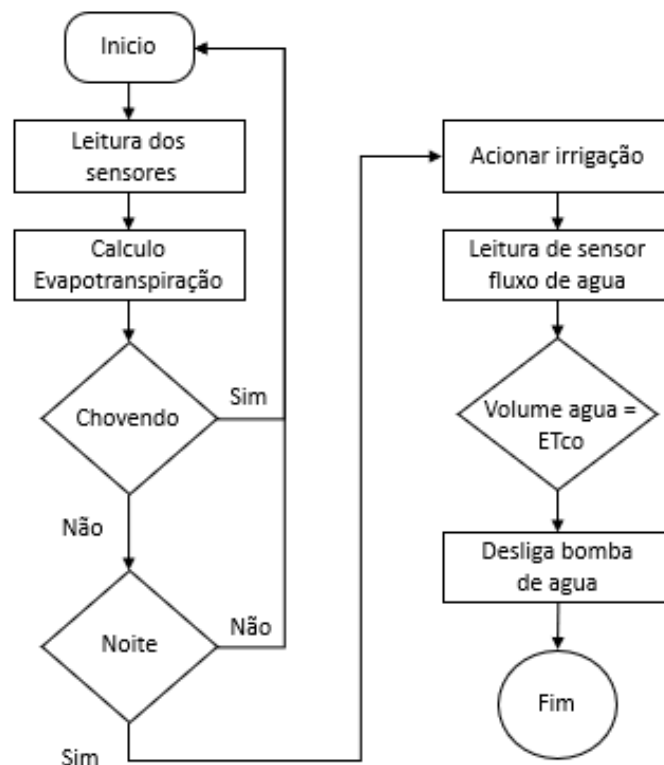
$$X = (1 - [\tan(\varphi)]^2[\tan(\delta)]^2) \quad (20)$$

Os cálculos descritos neste roteiro são realizados em um script em Python na Raspberry Pi, utilizando os dados obtidos por meio dos sensores, desta forma calculando a evapotranspiração da cultura que está sendo irrigada.

4.1.13 Algoritmo

O algoritmo de acionamento consiste em analisar dados lidos pelos sensores e decidir o melhor momento que o sistema de irrigação deve ser acionado, baseado na quantidade de água estimada pelas equações de evapotranspiração, visando acionar o sistema de irrigação no melhor horário em período noturno. Desta maneira evitam-se gastos desnecessários com a concessionária de energia. Além disso, será evitado desperdício de água devido às condições de temperatura e a evaporação da água irrigada ser menor em relação ao período diurno. A figura 42 apresenta o fluxograma do algoritmo de acionamento do sistema de irrigação.

Figura 42 – Fluxograma do sistema de acionamento do dispositivo

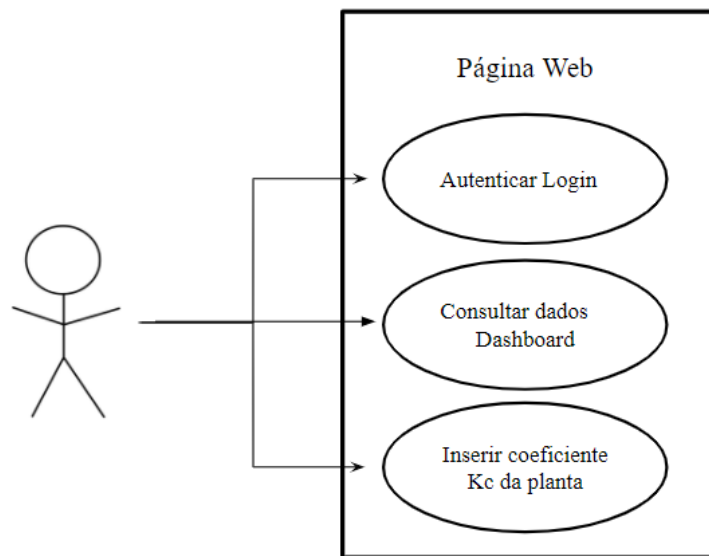


Fonte: Autoria própria.

4.1.14 Pagina Web

A página web desenvolvida consiste em exibir a tela de autenticação de login, leitura dos sensores e possibilitar a inserção do coeficiente de cultura para cada planta. Todos os dados são lidos através de uma ESP32 e são disponibilizados na dashboard com as leituras em tempo real, para que o usuário possa monitorar as condições do ambiente e o funcionamento do sistema de irrigação. A figura 43 apresenta o diagrama de caso de uso do sistema web desenvolvido para exibir os dados na página web.

Figura 43 – Diagrama de caso de uso sistema web



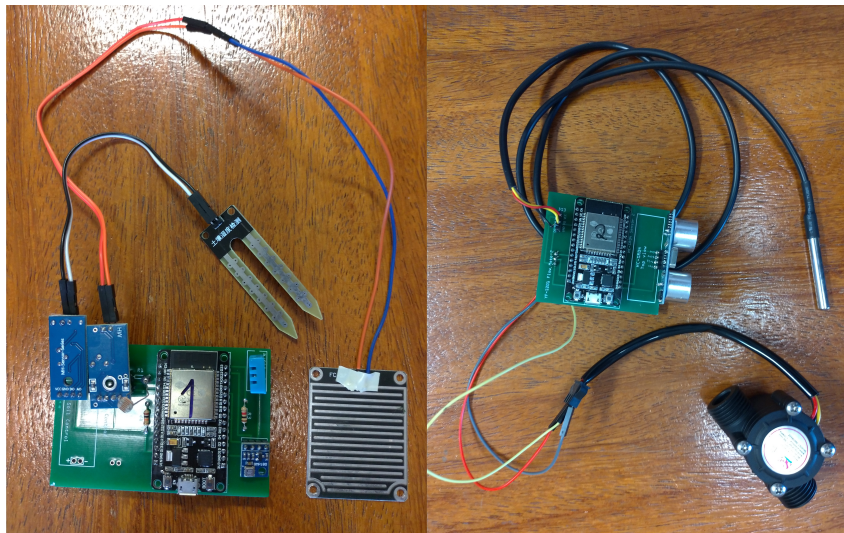
Fonte: Autoria própria.

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 Protótipo - Hardware

Cada microcontrolador escravo foi instalado em uma PCB dedicada a aquisição de dados específicos. Como a ESP32 master e a raspberry pi são utilizadas para fazer a comunicação MQTT e ESP-NOW, não foi necessário o desenvolvimento de uma PCB dedicada, sendo utilizado apenas uma fonte de alimentação para ambas. A figura 44 apresenta a montagem do dispositivo em bancada laboratorial.

Figura 44 – Montagem do dispositivo em bancada

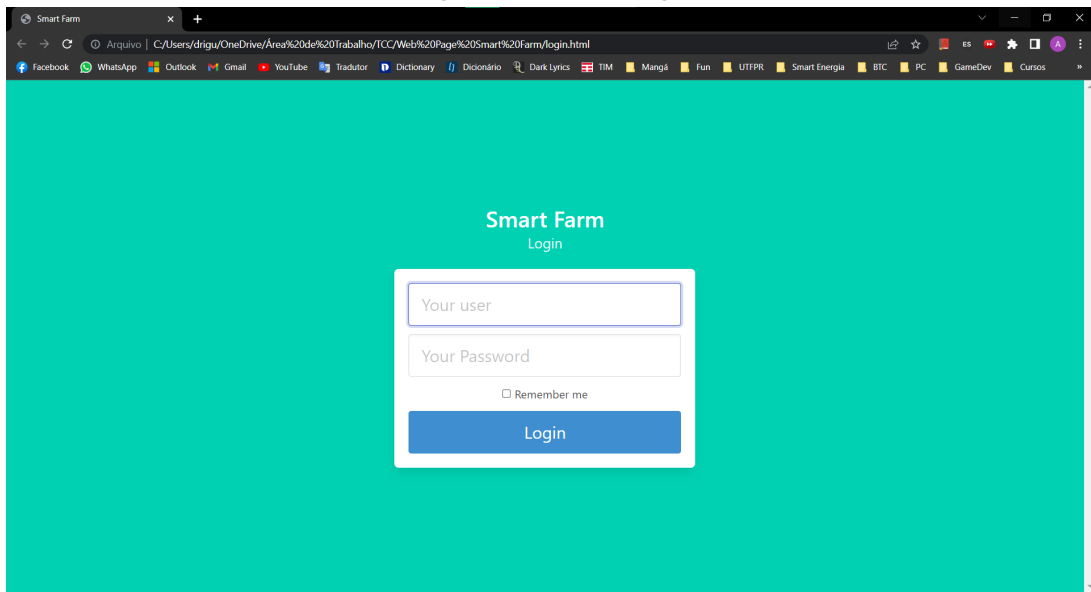


Fonte: Autoria própria.

5.2 Protótipo - Software

As telas para visualização de dados de forma online e autenticação de usuário, foram desenvolvidas utilizando a linguagem de programação HTML, CSS e JavaScript. A figura 45 apresenta a interface de autenticação do usuário com o sistema.

Figura 45 – Tela de login



Fonte: Autoria própria.

As leituras do sensor são enviadas via MQTT para o sistema e são apresentados no formato de dashboard em uma página web utilizando JavaScript, HTML e CSS. A figura 46 apresenta a tela do painel de monitoramento do sistema. A visualização e monitoramento do sistema também são compatíveis com dispositivos móveis, como smartphones e tablets.

Figura 46 – Tela de monitoramento do dispositivo



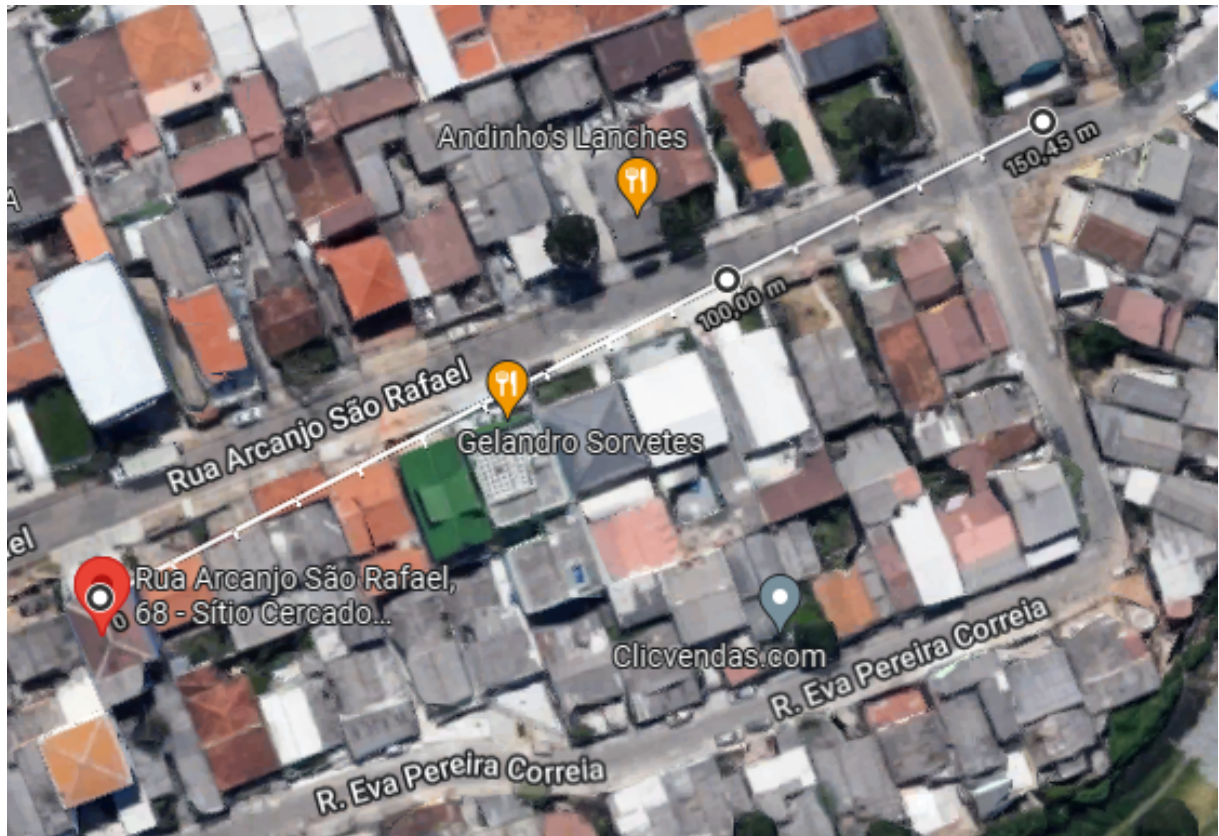
Fonte: Autoria própria.

5.3 Comunicação Sem fio

Com o objetivo de comprovar que a comunicação sem fio e sem internet funcionava sem falhas, a uma distância maior que 150 metros sem barreiras, posicionamos inicialmente

as ESP32 Slave 1 e 2 a uma distância de 100 metros da ESP32 Master e todas as aquisições estavam sendo recebidas no servidor MQTT e dashboard. Também posicionamos os dispositivos a uma distância de 150 metros entre eles; entretanto, o dispositivo apresentou menor velocidade de envio dos dados. Como existe um grande intervalo entre as aquisições de dados, a aplicação do protótipo não será afetada. A figura 47 apresenta a distância real entre os módulos durante as aquisições de prova de conceito.

Figura 47 – Distância entre módulos



Fonte: Autoria própria.

5.4 Comparação de custos

O presente projeto além de desenvolver uma comunicação wireless entre sensores, também tinha como objetivo facilitar a montagem do equipamento e proporcionar uma redução de custos devido à remoção de cabos para a aquisição de dados em relação ao projeto desenvolvido pelo Lucas B. Tsuchiya (TSUCHIYA, 2020). Para comprovar a eficácia do projeto neste quesito, foi desenvolvida uma tabela com os custos estimados para a montagem de ambos os projetos, sem valores de mão de obra, tomando como base os componentes utilizados em cada projeto, bem como eventuais componentes adicionais necessários para atingir o requisito de alcance de 100 metros. O resultado é uma expressiva redução de custos, como demonstra a figura 48.

Figura 48 – Redução de custos

Dispositivo	Projeto Atual		Projeto Lucas	
	Quantidade	Preço Unitário (R\$)	Quantidade	Preço Unitário(R\$)
ESP32	3	80,00	-	-
Sensor Ultrassonico	1	20,00	-	-
Sensor de Umidade do Solo	1	10,00	1	10,00
Sensor de chuva	1	10,00	1	10,00
Sensor LDR	1	1,00	1	1,00
DHT22	1	60,00	1	60,00
DS18B20	1	20,00	1	20,00
BMP180	1	20,00	1	20,00
Sensor de Fluxo	1	50,00	1	50,00
Módulo relé	1	20,00	1	20,00
Raspberry Pi 3	1	1300,00	1	1300,00
PCB	2	150,00	1	150,00
MCP3008	-	-	1	15,00
Sensor de vento	-	-	1	400,00
Sensor de pH	-	-	1	150,00
Pluviometro	-	-	1	300,00
Modulo GPS	-	-	1	85,00
Cabo blindado 3 vias	-	-	1100	18,00
Valor Total	R\$ 2.051,00		R\$ 22.391,00	

Fonte: Autoria própria.

6 CONCLUSÃO

6.1 Projeto anterior e projetos futuros

O presente trabalho trata-se de uma evolução do projeto desenvolvido inicialmente por Lucas B. Tsuchiya em seu trabalho de conclusão de curso (TSUCHIYA, 2020). Cabe aqui ressaltar os pontos de aprimoramento ao trabalho original realizados pelos autores, detalhados nos parágrafos seguintes.

Primeiramente, a evolução mais considerável do projeto foi a transição de um dispositivo totalmente cabeado para um dispositivo wireless e modular, sendo esta a grande proposta do projeto, possibilitando aplicações mais robustas, como grandes plantações. Este ponto chave fez com que outras questões também fossem alteradas, para manter o bom funcionamento do dispositivo, ou aprimorá-lo.

A modularidade foi atingida agregando três microcontroladores ESP-32 ao projeto em conjunto com uma Raspberry Pi, permitindo a utilização do protocolo ESP-NOW e do MQTT. Com isso, foi obtida uma maior liberdade na montagem dos sensores para aquisição de dados e não necessitando de uma conexão direta com a rede internet, sendo possível utilizar apenas uma rede privada para envio dos dados via MQTT e visualização dos dados em dashboard.

Devido à proposta do projeto ser o desenvolvimento de um equipamento totalmente wireless, todo o projeto elétrico (Hardware) foi alterado, separando a única placa de desenvolvimento e aquisição de dados projetada por Lucas B. Tsuchiya (TSUCHIYA, 2020) em duas novas placas de aquisição de dados independentes. Além disso, utiliza-se uma placa de desenvolvimento (Raspberry Pi), que é alimentada em conjunto com a ESP-32 central através de uma power bank, evitando assim a necessidade de desenvolver uma PCI dedicada para ambos os microcontroladores.

O método de desenvolvimento da dashboard também foi alterado, pois, ao invés de utilizar o servidor Apache, foi utilizado o NGINX, que trata-se de um software de código aberto que pode ser utilizado em sistemas operacionais Unix e Windows. Esse software possibilitou um aprimoramento na velocidade de execução da dashboard, pois ao contrário do Apache, o NGINX utiliza apenas uma thread para atender todas as solicitações.

A partir das experiências obtidas por meio deste projeto é indicado que sejam feitas as seguintes atividades:

- Desenvolvimento de relatórios enviados periodicamente ao usuário via e-mail, com dashboards e histórico de dados;
- Alimentação dos módulos de aquisição utilizando energia solar;
- Utilização de sensores com maior resolução;
- Aumentar a distância máxima de comunicação entre os módulos;

- Desenvolvimento de um módulo específico para análise e controle de qualidade da água na irrigação;
- Desenvolvimento de um módulo específico para análise das características do solo utilizando métodos computacionais;
- Desenvolvimento de mais módulos de aquisição de dados, voltados para grandezas não abordadas neste trabalho;
- Acoplamento do sistema a uma rede real de irrigação, com acionamento por solenoide ou outro dispositivo similar.

6.2 Considerações finais

O objetivo central deste trabalho era desenvolver um equipamento que fosse capaz de fazer a comunicação de sensores com uma central de análise de dados de maneira wireless, sem utilizar a rede internet. Analisando os resultados obtidos no capítulo 5, conclui-se que o dispositivo projetado cumpriu sua principal função, além de estimar a quantidade de água necessária para cultura de planta desejada.

Apesar dos sensores e microcontroladores utilizados serem considerados de baixo desempenho e precisão, foi possível demonstrar que a comunicação foi feita sem interrupções e com um alcance razoável, podendo ser facilmente utilizado em ambiente doméstico, estufas e pequenas plantações, podendo também ser aplicado em produções de grande porte, realizando as devidas adaptações nos sensores e no sistema hidráulico.

O desenvolvimento do trabalho estimulou a extensão do conhecimento em diversas áreas, dentro e fora do escopo do curso de engenharia eletrônica, como: redes, comunicação sem fio, microcontroladores, fabricação eletrônica e prototipação, agronomia, hidrologia, e empreendedorismo. Desta forma, ele possibilitou o enriquecimento de conhecimento e uma ampla visão na aplicação de tecnologias e eletrônica para o agronegócio, solução de problemas, automação ou melhorias de processos em geral.

REFERÊNCIAS

- ALVES, P. **LDR – O que é e como funciona!** 2019. <https://www.manualdaeletronica.com.br/ldr-o-que-e-como-funciona/>. Acessado em Dezembro/2021.
- AOSONG. <https://akizukidenshi.com/download/ds/aosong/DHT11.pdf>. 2016. Acessado em dezembro/2021.
- ARDUOELETRO. **SENSOR DE FLUXO DE ÁGUA YF-S201 1-30L/MIN VAZÃO.** 2020. <https://www..com/sensor-medidor-de-vazao-yf-s201-1-30lmin-fluxo>. Acessado em Novembro/2021.
- AUTOCORE. **Módulo Sensor de Chuva.** 2020. <https://www.autocorerobotica.com.br/modulo-sensor-de-chuva>. Acessado em Novembro/2021.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de Irrigação.** [S.l.]: MIT Press, 2006.
- BMP180. **BMP180 Digital pressure sensor.** 2013. <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/1132068/BOSCH/BMP180.html>. Acessado em Junho/2021.
- BOAS. **Irrigação, uma prática que aumenta a produtividade no campo.** 2017. <https://boaspraticasagronicas.com.br/boas-praticas/irrigacao/>. Acessado em Julho/2021.
- BOJORGE, N. **Medição de Pressão.** 2013. <http://www.professores.uff.br/ninoska/wp-content/uploads/sites/57/2018/04/Aula-04>Acessado em Julho/2021.
- BORGES, L. E. **Python Para Desenvolvedores.** [S.l.]: Novatec, 2006.
- CANALTI. **Sistemas Embarcados.** 2017. <https://www.canalti.com.br/programacao/sistemas-embarcados/>. Acessado em Novembro/2021.
- CONCEIÇÃO, M. A. F. **Manejo da irrigação.** 2005. Acessado em Junho/2021.
- CURTOCIRCUITO. **Destrinchando a estrutura do ESP32 e suas funções importantes.** 2018. <https://www.curtocircuito.com.br/blog/Categoria>Acessado em Dezembro/2021.
- ELETROGATE. **Sensor de Pressão Barométrico BMP180.** 2020. Acessado em Novembro/2021.
- EMBRAPA. **Água e produção de alimento em áreas irrigadas: quais os desafios para a pesquisa?** 2020. <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/51253518/artigo—agua-e-producao-de-alimento-em-areas-irrigadas-quais-os-desafios-para-a-pesquisa>. Acessado em Julho/2021.
- ENGPROCESS. **Mosquito – Entenda suas funcionalidades e vantagens!** 2018. <https://engprocess.com.br/mosquito/>. Acessado em Outubro/2021.
- EOS. **A SITUAÇÃO DO CONSUMO E DESPERDÍCIO DE ÁGUA NO BRASIL.** 2017. <https://www.eosconsultores.com.br/consumo-e-desperdicio-de-agua/>. Acessado em Julho/2021.
- EVEO. **NGINX: o que é e por que utilizar?** 2019. <https://www.eveo.com.br/blog/nginx/?msclkid=5ac89d7fa6c411ec9d3eb99a5d699dc4>. Acessado em Fevereiro/2022.

- FILIFELOP. **Como conectar o Sensor Ultrassônico HC-SR04 ao Arduino**. 2011. <https://www.filipeflop.com/blog/sensor-ultrassonico-hc-sr04-ao-arduino/>. Acessado em Dezembro/2021.
- FILIFELOP. **Módulo Relé 5V 4 Canais**. 2019. <https://www.filipeflop.com/produto/modulo-rele-5v-4-canais/>. Acessado em Novembro/2021.
- FILIFELOP. **Sensor de Umidade do Solo Higrômetro**. 2020. <https://www.filipeflop.com/produto/sensor-de-umidade-do-solo-higrometro/>. Acessado em Novembro/2021.
- FILIFELOP. **Sensor de Umidade e Temperatura DHT11**. 2021. Acessado em Novembro/2021.
- FONSECA, M. A. C. Roteiro de cálculo da evapotranspiração de referência pelo método de penman-monteith-fao. **Circular Técnica**, v. 65, n. 1, p. 1–8, Dezembro 2006. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/541867/roteiro-de-calculo-da-evapotranspiracao-de-referencia-pelo-metodo-de-penman--monteith-fao>.
- GARCIA, V. G. *et al.* Monitoramento inteligente de consumo de Água em chuveiros para o uso racional dos recursos hídricos nas residências. **17º Congresso Nacional de Iniciação Científica**, v. 1, n. 1, p. 1, September 2017. Disponível em: <http://www.ipni.net/publication/ia-brasil.nsf/0/28F4927903D4F4B983257A9B0041AFF2/FILE/IAPage24-139.pdf>.
- IOT, W. **Mapeamentos de PIN do Raspberry Pi 2 3**. 2022. <https://docs.microsoft.com/pt-br/windows/iot-core/learn-about-hardware/pinmappings/pinmappingsrpi>. Acessado em Fevereiro/2022.
- LUNICOM. **Relé 5 Pinos 6v 12amp Na/nf**. 2019. <https://www.lojalunicom.com.br/rele-mini-industrial-ya318-c-12vdc-nanf-2015a-5-pinos-selado/prod-5340496/>. Acessado em Novembro/2021.
- MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: Princípios e Métodos**. [S.l.]: MIT Press, 2009.
- MARQUES, J. **O Que É ESP-NOW - E Como Funciona?** 2020. <https://www.fvml.com.br/2020/01/o-que-e-esp-now-e-como-funciona-codigo.html>. Acessado em Outubro/2021.
- MATTEDE, H. **Como funciona um relé? O que é um relé?** 2014. <https://www.mundodaeletrica.com.br/como-funciona-um-rele-o-que-e-um-rele/>. Acessado em Novembro/2021.
- MISCHIANTI, R. **DOIT ESP32 DEV KIT v1 high resolution pinout and specs**. 2021. <https://www.mischianti.org/2021/02/17/doit-esp32-dev-kit-v1-high-resolution-pinout-and-specs/>. Acessado em Novembro/2021.
- MOZILLA. **O que é um servidor web (web server)?** 2021. https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Learn/Common_questions/What_is_a_web_server. Acessado em Dezembro/2021.
- MUNDOPROJETADO. **LDR – O que é e como funciona**. 2020. <http://mundoprojetado.com.br/ldr-o-que-e-e-como-funciona/>. Acessado em Novembro/2021.
- MURTA, G. **Guia do Sensor de umidade do solo e Sensor de chuva**. 2019. <https://blog.eletrogate.com/guia-do-sensor-de-umidade-do-solo-e-sensor-de-chuva/>. Acessado em Junho/2021.

- NAANDANJAIN. **Automação em um sistema de irrigação: o que saber?** 2015. <https://naandanjain.com.br/automacao-em-um-sistema-de-irrigacao-o-que-saber/>. Acessado em Julho/2021.
- NERI, R.; LOMBA, M.; BULHÕES, G. **Protocolo MQTT**. 2019. <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2019-1/vf/mqtt/>. Acessado em Outubro/2021.
- PATSKO, L. F. **Tutorial Controle de Relés**. Instrumentação Eletrônica: Maxwell Bohr, 2006.
- PHOTORESISTOR. **GL105 Series Photoresistor**. 2016. <https://www.futurlec.com/Datasheet/PHOTOCELL10-14.pdf>. Acessado em Junho/2021.
- RANDOMNERDTUTORIALS. **Getting Started with ESP-NOW (ESP32 with Arduino IDE)**. 2020. <https://randomnerdtutorials.com/esp-now-esp32-arduino-ide/>. Acessado em Dezembro/2021.
- RIOS, B.; ASSIS, G. de; SOARES, M. **REDES DE SENSORES SEM FIO**. 2018. <https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2018-1/trabalhos-vf/rssf/>. Acessado em Outubro/2021.
- SAATH, A. L. F. Kleverton Clovis de O. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, p. 195–212, 2018. Disponível em: <https://www.revistasober.org/article/doi/10.1590/1234-56781806-94790560201>.
- SCHNEIDER, A. de O.; ANDRADE, F. S. de. **Sistemas Embarcados - Hardware e Firmware**. [S.l.]: Saraiva, 2010.
- SILVA, M. S. **Criando Sites com HTML - Sites de Alta qualidade com HTML e CSS**. [S.l.]: Novatec, 2006.
- TECHSULELETRÔNICOS. **Sensor de Temperatura – DS18B20 (prova d'água)**. 2020. <https://techsuleletronicos.com.br/product/sensor-de-temperatura-ds18b20-prova-dagua/>. Acessado em Agosto/2021.
- THOMAZINI, D.; ALBURQUERQUE, P. U. B. de. **Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações**. [S.l.]: Saraiva, 2011.
- THOMSEN, A. **Como conectar o Sensor Ultrassônico HC-SR04 ao Arduino**. 2011. <https://www.filipeflop.com/blog/sensor-ultrassonico-hc-sr04-ao-arduino/>. Acessado em Dezembro/2021.
- TOTVS. **Tecnologia de irrigação: Conheça seus tipos e vantagens**. 2020. <https://www.totvs.com/blog/gestao-agricola/tecnologia-de-irrigacao/>. Acessado em Julho/2021.
- TOWNSEND, K. **Using the BMP085/180 with Raspberry Pi or Beaglebone Black**. 2012. <https://learn.adafruit.com/using-the-bmp085-with-raspberry-pi/using-the-adafruit-bmp-python-library>. Acessado em Setembro/2021.
- TSUCHIYA, L. B. Dispositivo de controle, monitoramento e acionamento aplicado a sistemas de irrigação. v. 1, p. 74, October 2020.
- YF-201. **Datasheet YF-201**. 2013. <https://www.hobbytronics.co.uk/datasheets/sensors/YF-S201.pdf>. Acessado em Agosto/2021.
- ZAMBENEDETTI, L.; CARISSIMI, A. da S.; ROCHOL, J. **Redes de Computadores**. [S.l.]: MIT Press, 2006.