

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

Guilherme Lopes Matias

**Projeto de estação meteorológica portátil para
monitoramento remoto das condições climáticas**

São Carlos

2025

Guilherme Lopes Matias

**Projeto de estação meteorológica portátil para
monitoramento remoto das condições climáticas**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica com Ênfase em Eletrônica, da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Pedro de Oliveira C. Junior

**São Carlos
2025**

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

M433p	Matias, Guilherme Lopes Projeto de estação meteorológica portátil para monitoramento remoto das condições climáticas / Guilherme Lopes Matias; orientador Pedro de Oliveira Conceição Junior. São Carlos, 2025. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2025. 1. Estação climática. 2. Monitoramento remoto. 3. Sensoriamento. 4. Clima. 5. Transmissão de dados. 6. Hardware. I. Título.
-------	--

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Guilherme Lopes Matias

Título: “Projeto de estação meteorológica portátil para monitoramento remoto das condições climáticas”

**Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em
01/07/2025,**

**com NOTA 8,5 (oito , cinco), pela Comissão
Julgadora:**

**Prof. Dr. Pedro de Oliveira Conceição Junior - Orientador
SEL/EESC/USP**

Prof. Titular Ivan Nunes da Silva - SEL/EESC/USP

**Prof. Associado Marcelo Andrade da Costa Vieira -
SEL/EESC/USP**

**Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Professor Associado José Carlos de Melo Vieira Júnior**

AGRADECIMENTOS

Desejo expressar meus agradecimentos:

Primeiramente aos meus pais, Reginaldo Gimenez Matias e Maria de Lourdes Lopes Matias, por terem sempre me apoiado e incentivado a seguir meus sonhos.

Ao meu orientador o professor Dr. Pedro de Oliveira Conceição Junior que me ensinou muito durante minha graduação e aceitou ser meu orientador no desenvolvimento deste trabalho.

E a todos meus professores e colegas que tive a oportunidade de conhecer durante minha graduação, que me auxiliaram e fizeram parte dessa jornada.

RESUMO

Matias, G. **Projeto de estação meteorológica portátil para monitoramento remoto das condições climáticas**. 2025. 70 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

Com as mudanças climáticas que tem ocorrido com o passar do tempo e o avanço das tecnologias IoT (*Internet of Things*) tem havido um crescente investimento no monitoramento e estudo do clima fazendo uso dessas tecnologias, principalmente na área agrícola, na geração de energias renováveis e para estudos em climatologia. Deste modo, este trabalho tem como objetivo documentar a implementação do projeto de uma estação meteorológica portátil, formada por dois circuitos (transmissor e receptor), e que possibilite o monitoramento de seis variáveis climáticas, temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação de chuva, velocidade e direção do vento, além de monitorar a tensão e corrente das baterias utilizadas para alimentar o circuito, de forma remota em uma plataforma online, por um período de pelo menos 24 horas, em ambientes que estão alguns quilômetros de distância de conexão Wi-Fi. O projeto atual visa sua aplicação principalmente em ambientes rurais de pequeno porte e próximos a locais com acesso à internet, sendo uma alternativa com valor mais acessível do que outras opções disponíveis no mercado, e ainda que apresente maior precisão nas medições locais do que os dados disponíveis por previsões do tempo realizadas por medições por satélites, que realizam medições de amplas áreas. Após implementação e testes o protótipo do dispositivo projetado apresentou uma distância de 2,5 quilômetros em linha reta entre os circuitos transmissor e receptor sem apresentar perda de dados, e uma distância máxima de 4 quilômetros com perda de dados. O circuito transmissor conseguiu permanecer operando por mais de 24 horas utilizando o modo de economia de energia (*Deep Sleep*) disponível no microcontrolador ESP32, sendo alimentado por duas baterias de Li-ion 18650 de 9800 mAh em série. Ao final dos testes do protótipo foi possível comprovar o funcionamento do circuito projetado, comprovando que os parâmetros de projeto, distância de transmissão de dados, e tempo de operação foram atendidos, e que o orçamento utilizado no projeto foi menor do que produtos semelhantes disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Estação climática; Monitoramento; IoT; Hardware; LoRa.

ABSTRACT

Matias, G. **Projeto de estação meteorológica portátil para monitoramento remoto das condições climáticas**. 2025. 70 p. Monograph (Conclusion Course Paper) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2025.

With the climate changes that have occurred over time and the advancement of IoT technologies (Internet of Things) there has been a growing investment in monitoring and studying the climate using these technologies, mainly in the agricultural area, in the generation of renewable energy and for studies in climatology. Thus, this work aims to document the implementation of a portable weather station project, consisting of two circuits (transmitter and receiver), which allows the monitoring of six climate variables, temperature, humidity, atmospheric pressure, rainfall, wind speed and wind direction, and also monitor the voltage and current of the batteries used to power the circuit, remotely using an online platform, for a period of at least 24 hours, in environments that are a few kilometers away from a Wi-Fi connection. The current project is intended for application in small rural environments and close to places with internet access, being a more affordable alternative than other options available on the market, and also presenting greater precision in local measurements than the data available from weather forecasts carried out by satellite measurements, which perform measurements of large areas. After implementation and testing, the prototype of the designed device presented a distance of 2.5 kilometers in a straight line between the transmitter and receiver circuits without presenting data loss, and a maximum distance of 4 kilometers with data loss. The transmitter circuit was able to remain operating for more than 24 hours using the power saving mode (*Deep Sleep*) available in the ESP32 microcontroller, and being powered by two 9800 mAh Li-ion 18650 batteries in series. At the end of the prototype tests, it was possible to verify the operation of the designed circuit, proving that the design parameters, data transmission distance, and operating time were met, and that the budget used in the project was lower than similar products available on the market.

Keywords: Weather Station; Monitoring; IoT; Hardware; LoRa.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Dados do novo Plano da Operação Energética (PEN) 2024	22
Figura 2 – Esquema do projeto (Moreira, 2019)	23
Figura 3 – Miniestação montada (Moreira, 2019)	24
Figura 4 – Diagrama do end device (Germano <i>et al.</i> , 2022)	25
Figura 5 – Diagrama do gateway (Germano <i>et al.</i> , 2022)	25
Figura 6 – Diagrama de blocos estação meteorológica (Figueiró, 2022)	27
Figura 7 – Estação meteorológica WS-2902	28
Figura 8 – Exemplo de escrita I2C no registrador de um dispositivo <i>slave</i>	29
Figura 9 – Exemplo de leitura I2C do registrador de um dispositivo <i>slave</i>	29
Figura 10 – Conexão do protocolo UART	30
Figura 11 – Estrutura de dados do protocolo UART	30
Figura 12 – Circuito transmissor implementado	33
Figura 13 – Circuito receptor implementado	34
Figura 14 – Diagrama de blocos interno do ESP32	36
Figura 15 – Módulo ESP32 DevKit V1	36
Figura 16 – Pinagem do módulo ESP32 DevKit V1	37
Figura 17 – Módulo AM2302 DHT22	37
Figura 18 – Sensor DHT11	38
Figura 19 – Módulo sensor BMP280	39
Figura 20 – Sensor de precipitação de chuva	40
Figura 21 – Sensor de Velocidade do Vento	42
Figura 22 – Sensor de direção do vento	43
Figura 23 – Sensor de Tensão e Corrente INA219	44
Figura 24 – Módulo E220-900T30D	45
Figura 25 – Placa FTDI FT232RL - Conversor USB Serial	46
Figura 26 – Software de configuração para módulos E220	47
Figura 27 – Módulo Step Down LM2596	47
Figura 28 – Módulo Step Up SDB628	48
Figura 29 – Diagrama em blocos da distribuição de energia do circuito transmissor	48
Figura 30 – Diagrama em blocos da distribuição de energia do circuito receptor	49
Figura 31 – Diagrama de fluxo de dados	49
Figura 32 – Fluxograma do software do circuito transmissor	50
Figura 33 – Fluxograma do software do circuito receptor	51
Figura 34 – Distância máxima entre transmissor e receptor	53
Figura 35 – Gráficos <i>ThingSpeak</i> - Teste em campo	56
Figura 36 – Previsão do Tempo Santo Anastácio - 03/05/2025	57

Figura 37 – Gráficos *ThingSpeak* - Teste em Deep Sleep 59

Figura 38 – Previsão do Tempo Campinas - 01/06/2025 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações DHT22 e DHT11	38
Tabela 2 – Especificações BMP280	39
Tabela 3 – Dados para calibração do sensor de chuva	40
Tabela 4 – Especificações do Sensor de Velocidade do Vento	42
Tabela 5 – Especificações do Sensor de Direção do Vento	43
Tabela 6 – Especificações INA219	44
Tabela 7 – Especificações E220-900T30D	45
Tabela 8 – Consumo do circuito transmissor com todos os sensores	54
Tabela 9 – Consumo do circuito transmissor com metade dos sensores	54
Tabela 10 – Consumo do circuito transmissor com metade dos sensores e o ESP32 em <i>Deep Sleep</i>	55
Tabela 11 – Conversão das medições em direções	57
Tabela 12 – Comparação da previsão do tempo e da	60

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Quadro de comparação entre trabalhos relacionados	28
Quadro 2 – Especificações do protótipo	34
Quadro 3 – Lista de materiais	35
Quadro 4 – Conexões do DHT22	38
Quadro 5 – Conexões do BMP280	39
Quadro 6 – Conexões do Sensor de Velocidade do Vento	42
Quadro 7 – Conexões do Sensor de Direção do Vento	43
Quadro 8 – Conexões do INA219	44
Quadro 9 – Conexões do E220-900T30D	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
GND	<i>Ground</i> (terra)
IoT	<i>Internet of Things</i> (internet das coisas)
I2C	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Inter-Integrado)
LoRa	<i>Long Range</i> (Longo Alcance)
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PCI	Placa de circuito impresso
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver/Transmitter</i> (Receptor/Transmissor Universal Assíncrono)
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Ampère
bps	Bits por segundo
cm^2	Centímetros cuadrados
°C	Graus Celsius
hPa	Hectopascal
km	Quilômetros
mA	Miliampere
mAh	Miliampere-hora
MHz	Megahertz
ml	Mililitros
mm	Milímetros
m/s	Metros por Segundo
Pa	Pascal
V	Volts
W	Watts

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
2.1	Revisão bibliográfica	23
2.1.1	Desenvolvimento de uma miniestação meteorológica de baixo custo baseada na plataforma arduíno (Moreira, 2019)	23
2.1.2	Protótipo de solução IoT para uma estação meteorológica aplicando tecnologia LoRa no ambiente agro (Germano <i>et al.</i> , 2022)	24
2.1.3	Remote monitoring of long-distance environmental variables using embedded (Bautista-Vivanco <i>et al.</i> , 2024)	26
2.1.4	Projeto e desenvolvimento de estação meteorológica com RTC e comunicação Wi-Fi (Figueiró, 2022)	27
2.1.5	Comparação entre trabalhos relacionados	27
2.2	Protocolos de comunicação	28
2.2.1	I2C - Inter-Integrated Circuit	28
2.2.2	UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter	30
2.2.3	LoRa - Long Range	31
3	MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1	Microcontrolador	35
3.2	Sensores	37
3.2.1	Sensor de Temperatura e Umidade - DHT22	37
3.2.2	Sensor de Pressão - BMP280	38
3.2.3	Pluviômetro - MS-WH-SP-RG	40
3.2.4	Sensor de Velocidade do Vento - ZTS-3000-FSJT-V05	41
3.2.5	Sensor de Direção do Vento - PR-3000-FXJT-V05	42
3.2.6	Sensor de Tensão e Corrente - INA219	44
3.3	Módulo LoRa - E220-900T30D	45
3.4	Distribuição de energia	47
3.5	Software	49
3.5.1	ThingSpeak	50
3.5.2	Fluxogramas	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Teste de distância	53
4.2	Teste de consumo	54

4.3	Teste em campo	55
4.4	Teste em Deep Sleep	58
5	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	63
	APÊNDICES	67
	APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DOS CIRCUITOS TRANSMIS- SOR E RECEPTOR	69

1 INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo o monitoramento das condições climáticas tem sido cada vez mais importante para diversas áreas, como agricultura, geração de energias renováveis e pesquisas científicas.

Em 2024 o Brasil registrou o ano mais quente desde 1961, com uma média de temperatura de 25,02°C, superando em 0,79°C a média histórica entre 1991 e 2020. Esse aumento térmico teve impactos significativos na agricultura, especialmente em São Paulo (Candioto, 2025).

A produção de alimentos deve aumentar em 70% até 2050 para acompanhar o crescimento da população global, que deverá crescer para 9,7 bilhões, em relação aos 7,3 bilhões de 2016 (Arezki, 2017).

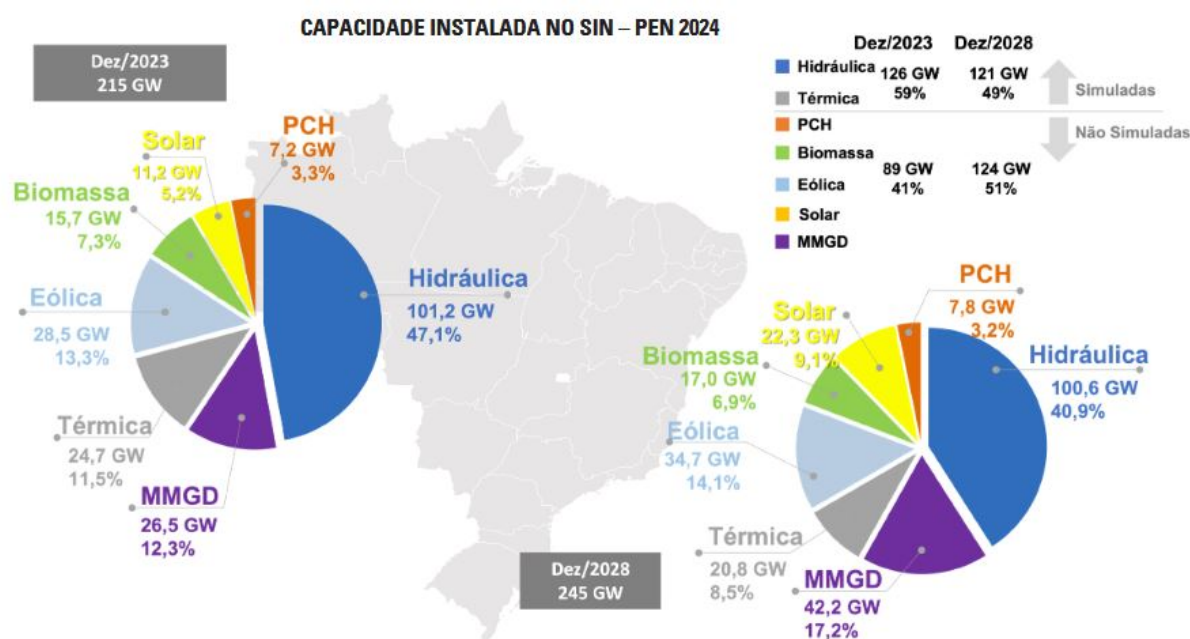
Com as variações climáticas que vem ocorrendo com o passar dos anos e as previsões de crescimento da população mundial mostra-se necessário o investimento em tecnologias de monitoramento e produção no cenário agrícola, dessa forma um conceito que tem crescido cada vez mais nas grandes produções agrícolas é a *Smart Farming*.

Smart Farming, ou agricultura inteligente, é uma abordagem moderna que utiliza tecnologias digitais, como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA) e *Big Data*, para otimizar a produção agrícola (Gomes, 2024). Apesar do avanço, desafios comuns persistem em ambos os países, como a falta de capacitação técnica e infraestrutura adequada, que dificultam a adoção em larga escala (Pivoto et al., 2023 apud Gomes, 2024).

Um estudo da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da Universidade de São Paulo (Esalq-USP) indica que apenas 5% da área agriculturável do país está conectada à internet, principalmente em grandes propriedades - há no Brasil enorme carência de infraestrutura de conexão, cujo custo terá que ser arcado pelas empresas de telecomunicações, governos ou fazendeiros. Para ampliar a cobertura para cerca de 90% seria necessário instalar aproximadamente 16 mil antenas de transmissão, segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). O Investimento estimado supera R\$ 8 bilhões (Agricultura... , 2020).

Segundo projeções divulgadas no novo Plano da Operação Energética (PEN) 2024 pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2028 as fontes de energia renováveis vão representar 51% da capacidade instalada de geração no Brasil. Na Figura 1 são apresentados os dados da geração energética do PEN de 2024.

Figura 1 – Dados do novo Plano da Operação Energética (PEN) 2024



Fonte: (ONS, 2024)

Dessa forma é observado que o monitoramento climático se mostra extremamente importante no desenvolvimento da agricultura e na implementação de sistemas de geração de energias renováveis, principalmente energia fotovoltaica e energia eólica.

Nesse contexto este trabalho tem o objetivo de realizar a implementação de *hardware* e *software* de uma estação meteorológica, ou seja, um dispositivo eletrônico que realize a medição de algumas variáveis do clima, e que disponibilize essas medições para acesso pela internet. A estação projetada possibilita o monitoramento de seis variáveis do clima, sendo elas, temperatura, umidade, pressão, precipitação de chuva, velocidade e direção do vento, realizando medições periódicas e de forma remota, disponibilizando os dados para acesso pela internet, no servidor do site *ThingSpeak*.

O protótipo realizado neste trabalho foi implementado para que possa ser utilizada por pequenos produtores agrícolas como uma alternativa às opções disponíveis no mercado, e com maior precisão em pequenas áreas do que os dados disponíveis na previsão do tempo, que realizam medições de amplas áreas utilizando satélites.

Como objetivos iniciais do trabalho estão, o acesso dos dados pela internet, distância entre os circuitos transmissor e receptor de alguns quilômetros, duração das baterias para monitoramento de pelo menos 24 horas, e preço de implementação menor que outras opções disponíveis no mercado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo do trabalho será apresentado uma revisão de alguns trabalhos semelhantes que inspiraram a escrita deste trabalho, e alguns conceitos teóricos sobre as tecnologias e protocolos de comunicação utilizados.

2.1 Revisão bibliográfica

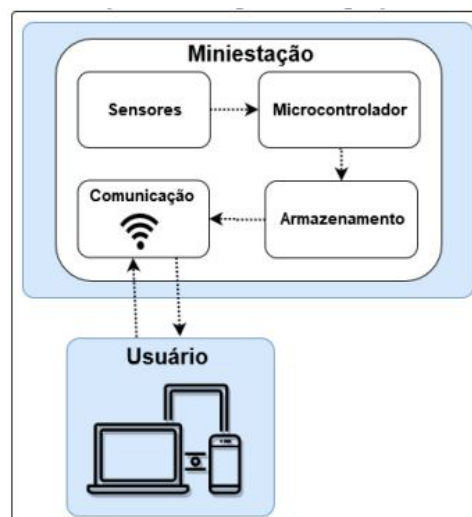
Nesta seção são apresentados uma breve descrição de trabalhos bibliográficos que serviram de referência bibliográfica para a escrita deste trabalho.

2.1.1 Desenvolvimento de uma miniestação meteorológica de baixo custo baseada na plataforma arduino (Moreira, 2019)

Este trabalho realiza a implementação de uma miniestação meteorológica com recursos de baixo custo, que utiliza o microcontrolador ESP32 e realiza leituras da umidade do ar, temperatura, chuva e umidade do solo, que são armazenadas e compartilhadas usando uma rede *Wi-Fi*, e para comprovar sua eficiência é realizada uma comparação com os dados de uma estação meteorológica convencional localizada no Campus da UFC (Universidade Federal do Ceará) na cidade de Quixadá.

Os sensores utilizados para as medições foram o DHT22 para medir temperatura e umidade, o sensor CS215 de temperatura e umidade relativa (para comparação de leituras), o sensor de chuva YL-83 e um sensor de umidade de solo. Na Figura 2 é apresentado o diagrama de blocos deste trabalho.

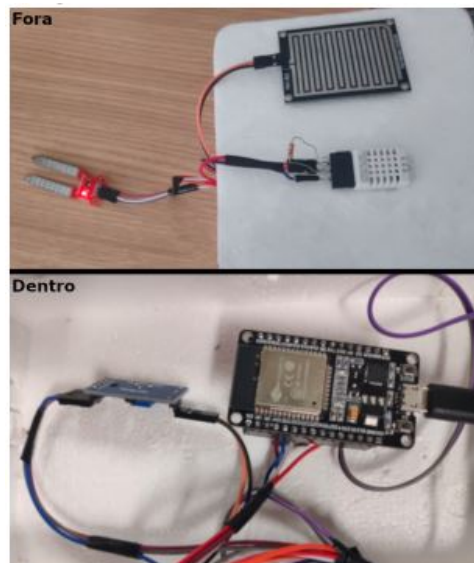
Figura 2 – Esquema do projeto (Moreira, 2019)



Fonte: (Moreira, 2019).

Na Figura 3 é apresentado uma imagem do circuito implementado.

Figura 3 – Miniestação montada (Moreira, 2019)



Fonte: (Moreira, 2019).

Para desenvolvimento do *software* foi utilizado a plataforma Arduino IDE. O armazenamento dos dados foi realizado na memória *flash* do ESP32, armazenando os dados coletados no período de uma semana, realizando medições a cada um minuto.

Para o acesso dos dados coletados foi criada uma página *WEB* que possibilita baixar um arquivo com os dados coletados na última hora ou no último minuto. Para realizar a coleta, o usuário se conecta no *Wi-Fi* da miniestação e abre a página *WEB* local com o IP do servidor *WEB* (Moreira, 2019).

Este trabalho apresenta a implementação de uma versão simplificada de uma estação meteorológica que apresentou um custo de R\$ 142,20, mas realiza a medição de apenas quatro variáveis e não possui conexão a *internet*, para a visualização dos dados é necessário se conectar ao *Wi-Fi* do módulo ESP32, impossibilitando o monitoramento de forma remota dos dados.

2.1.2 Protótipo de solução IoT para uma estação meteorológica aplicando tecnologia LoRa no ambiente agro (Germano *et al.*, 2022)

O trabalho de Stefane Bressani Germano apresentou a implementação de uma estação meteorológica com foco em baixo custo e consumo, tendo como objetivo analisar tecnologias sem fim no ambiente agro, utilizando principalmente o protocolo LoRaWAN (*Low Power WAN*).

No trabalho são utilizados os sensores, DHT22 para medir temperatura e umidade do ar, higrômetro HD-38 e o sensor de temperatura DS18B20, e a alimentação do circuito sendo realizada por uma bateria de lítio de 3,7V.



Para a validação dos circuitos foi realizado dois testes de distância, um em ambiente urbano e outro ambiente rural (receptor fixo e emissor em movimento no interior de um veículo). Para a visualização dos dados é utilizado a plataforma ThingSpeak. Os resultados obtidos foram uma distância de 1,46 quilômetros em zona urbana e 5,12 quilômetros em zona rural.

Este trabalho apresenta uma versão de estação meteorológica utilizando módulos ESP32 específicos que já possuem módulos LoRa e conexão com redes 2G na mesma placa, simplificando a implementação do *hardware* do projeto, para transmissão de dados entre *end device* e *gateway* foi utilizado o protocolo LoRaWAN, e possibilita o acesso aos dados medidos de forma remota, mantendo uma distância entre os dois circuitos de alguns quilômetros, tendo um orçamento de R\$377,43, mas que realiza o monitoramento de apenas quatro variáveis.

2.1.3 Remote monitoring of long-distance environmental variables using embedded (Bautista-Vivanco *et al.*, 2024)

O projeto apresentado por este artigo consiste em um sistema de monitoramento remoto de variáveis ambientais, formado por dois subsistemas, um responsável pela coleta e transmissão de dados, e outro que se comporta como *gateway* recebendo os dados e disponibilizando para acesso remoto em um servidor.

O subsistema de transmissão é formado pelo sensor de temperatura e pressão BMP280, um display OLED SSD1306 e um módulo LoRa E220-900T22D para a comunicação com o outro subsistema. Este circuito é alimentado por um painel fotovoltaica de 10 W, 12 V e baterias recarregáveis proporcionando sua autonomia.

Enquanto que o subsistema receptor é formado por um módulo receptor *gateway* LoRa-Ethernet E90-DTU da Ebyte, juntamente com uma Raspberry Pi 3B que realiza o processo de pegar os dados recebidos e disponibiliza-los em um servidor MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), o que facilita o seu monitoramento em tempo real.

Durante os teste realizados os autores do artigo conseguiram um alcance de aproximadamente 300 metros de distância entre os subsistemas.

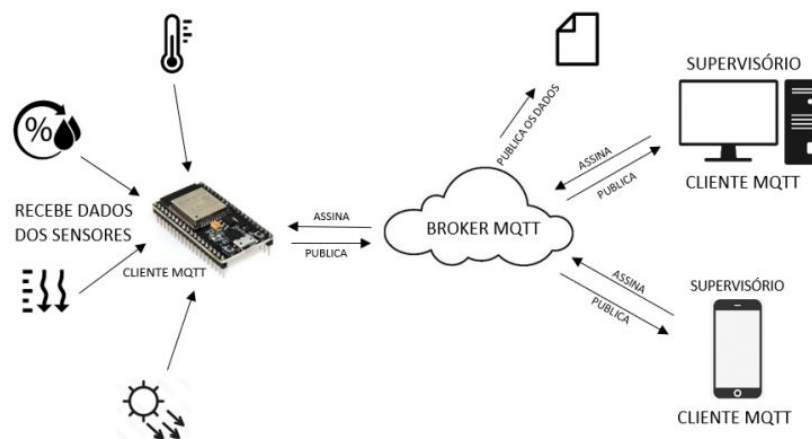
Dessa forma este trabalho apresenta uma versão de estação meteorológica independente que é alimentada por baterias e um placa fotovoltaica, e com acesso remoto dos dados utilizando o protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), mas a estação implementada realiza apenas a medição de duas variáveis e a distância entre os dois circuitos utilizados foi de apenas algumas centenas de metros.

2.1.4 Projeto e desenvolvimento de estação meteorológica com RTC e comunicação Wi-Fi (Figueiró, 2022)

Realiza estudo e prototipação de estação meteorológica automática de baixo custo para monitoramento de condições climáticas relevantes para a geração de energia fotovoltaica.

Este trabalho realiza medições de temperatura, umidade, pressão atmosférica e irradiância solar, fazendo uso de um ESP32 e um módulo RTC DS3231, que realiza atualizações de sua data e hora via internet, utilizando o protocolo NTP, e disponibiliza os dados medidos utilizando o protocolo MQTT, nas plataformas *ThingSpeak* usado com banco de dados, e no Blynk que é usado como supervisorio. O diagrama de blocos projeto implementado neste trabalho é apresentado nas Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de blocos estação meteorológica (Figueiró, 2022)



Fonte: (Figueiró, 2022).

Este trabalho apresenta o projeto de uma estação meteorológica independente que é alimentada por baterias e uma mini célula fotovoltaica, que possui conexão com a *internet* e disponibiliza os dados medidos em três plataformas diferentes, e que possui um orçamento de R\$ 271,31, mas que realiza a medição de apenas quatro variáveis, e precisa ser posicionado em um local com conexão Wi-Fi.

2.1.5 Comparação entre trabalhos relacionados

No Quadro 1 é descrita uma breve comparação entre os trabalhos apresentados anteriormente, este trabalho e a estação meteorológica WS-2902 que é um modelo de estação disponível no mercado fabricado pela empresa Ambient Weather. Na Figura 7 é apresentado uma imagem da estação WS-2902.

Quadro 1 – Quadro de comparação entre trabalhos relacionados

	<i>Internet</i>	Variáveis	Distância	Valor
(Moreira, 2019)	NÃO	4	local	R\$ 142,20
(Germano et al., 2022)	SIM	4	5,12 km	R\$ 377,43
(Bautista-Vivanco et al., 2024)	SIM	2	300 m	-
(Figueiró, 2022)	SIM	4	- (conexão Wi-Fi)	R\$ 271,31
Ambient Weather WS-2902	SIM	10	30,48 m	R\$ 1.192,06
Este trabalho	SIM	6	2,5 km	R\$ 638,24

Figura 7 – Estação meteorológica WS-2902



Fonte: Ambient Weather

2.2 Protocolos de comunicação

2.2.1 I2C - Inter-Integrated Circuit

I2C também conhecido como *Inter-Integrated Circuit*, IIC ou I^2C é um protocolo desenvolvido pela *Philips Semiconductors* na década de 1980 para comunicação entre dispositivos conectados a um barramento de dois fios.

As especificações do I2C definem seu barramento como um esquema de comunicação bidirecional de dois fios. Uma linha transporta os dados seriais (SDA) e a outra transporta o *clock* serial (SCL). Cada dispositivo I2C possui seu próprio endereço exclusivo, de 7 ou 10 bits. Um dispositivo I2C pode operar como *host* do barramento, *client* do barramento ou ambos, dependendo do dispositivo e da aplicação (Best, 2019). Em suas especificações são definidas as seguintes taxas de transferência de dados:

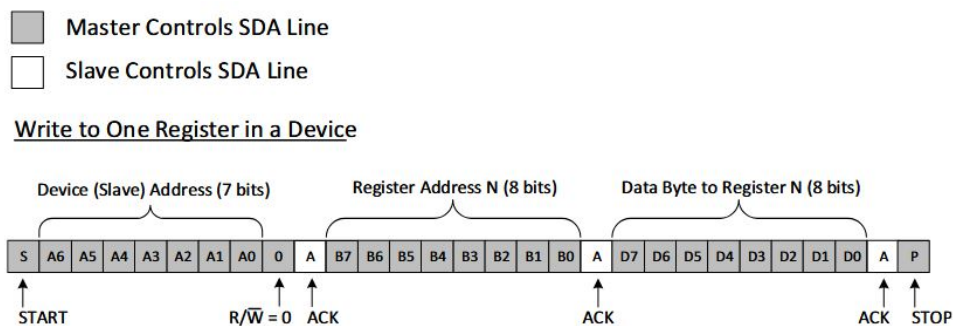
- **Standard mode** – taxas de transmissão de até 100 Kbits/s
- **Fast mode** – taxas de transmissão de até 400 Kbits/s

- **Fast mode Plus** – taxas de transmissão de até 1 Mbit/s
- **High-Speed mode** – taxas de transmissão de até 3.4 Mbits/s

O *host* também conhecido como *master* é o dispositivo que inicia a transferência de dados, gera o sinal de clock para sincronismo e encerra a transmissão, e o *client* também conhecido como *slave* é o dispositivo endereçado pelo *host*.

Os processos de escrita realizado pelo *host* e de leitura de um dispositivo *client* são apresentados pelas Figuras 8 e 9, respectivamente.

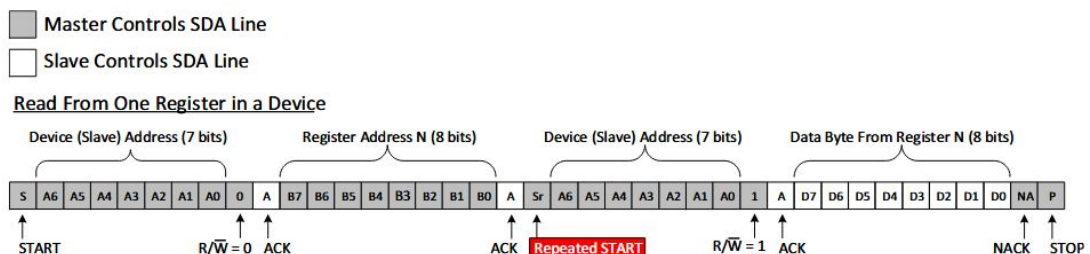
Figura 8 – Exemplo de escrita I2C no registrador de um dispositivo *slave*



Fonte: (Valdez; Becker, 2015).

No processo de escrita o *host* quer mandar um dado para o *client*, para isso ele manda uma condição de *START* e envia o endereço do *client*, o endereço do registrador a ser escrito e o dado a ser escrito, após completar a escrita é enviado uma condição de *STOP* para encerrar a transmissão.

Figura 9 – Exemplo de leitura I2C do registrador de um dispositivo *slave*



Fonte: (Valdez; Becker, 2015).

No processo de leitura o *host* quer receber um dado armazenado pelo *client*, para isso ele manda uma condição de *START* e envia o endereço do *client* e o endereço do registrador da mesma forma que na escrita, mas em seguida reenvia uma condições de *START* e o endereço do *client* para leitura, então aguarda o recebimento do dado solicitado, e após completar a leitura envia uma condição de *STOP* para encerrar a recepção.

2.2.2 UART - Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

UART é a sigla para *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*, que se refere a um protocolo de comunicação assíncrono de dois fios bidirecionais, que permitem a transmissão e recepção de dados entre dois dispositivos. Os dois fios utilizados na comunicação UART são o TX (transmissor) e RX (receptor), e para que a comunicação seja possível os dois dispositivos devem estar conectados à mesma referência (GND). A conexão entre dois dispositivos é representada pela Figura 10.

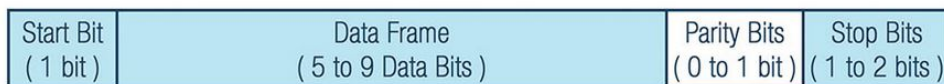
Figura 10 – Conexão do protocolo UART



Fonte: (ESP32... , 2024).

A estrutura do pacote de dados transmitidos por este protocolo é representado pela Figura 11.

Figura 11 – Estrutura de dados do protocolo UART



Fonte: (Peña; Legaspi, 2020).

- *Start Bit*: é o bit de sincronismo adicionado antes dos dados para indicar ao outro dispositivo o início da transmissão de dados.
- *Data Bits*: são os bits do dado a ser transmitido, que pode ter um tamanho entre 5 e 9 bits (caso seja utilizado o bit de paridade o dado pode ter no máximo 8 bits).
- *Parity Bit*: é o bit de paridade, que permite o receptor verificar se o dado recebido está correto. Este bit assume o nível lógico alto ou baixo de acordo com o número de bits "1" do dado a ser transmitido, de forma que se a paridade do dado for par ele assume nível lógico 0 e se for ímpar assume nível lógico 1. Seu uso é opcional.
- *Stop Bit*: é o bit de parada, que marca o fim da transmissão de dados.

Além disso o protocolo UART é *full-duplex*, ou seja, ele permite que um dispositivo transmita e receba dados simultaneamente.

2.2.3 LoRa - Long Range

A palavra LoRa vem da expressão em inglês “*Long Range*”, que em português significa longo alcance. Essa é uma tecnologia de comunicação sem fio e funciona através de rádio frequência. Basicamente, é uma técnica de modulação de espectro de espalhamento. Isso ocorre quando uma onda de rádio é manipulada para codificar informações usando um formato CSS (*Chirp Spread Spectrum*) (LLC, 2025).

A tecnologia LoRa permite a comunicação sem fio entre dispositivos a distâncias de até alguns quilômetros, possui baixo consumo de energia em comparação a outras tecnologias sem fio, permite a transmissão de dados em tempo real, possui uma comunicação robusta, não propagam ruídos e não sofrem interferência na sua faixa de frequência.

No Brasil a agência reguladora responsável pelo setor de telecomunicações é a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações), que define regras, padrões, e fiscaliza equipamentos e empresas da área da telecomunicação, e isso inclui a tecnologia LoRa.

Ambas soluções (Sigfox e LoRa) utilizam faixas de frequências não licenciadas, que no Brasil são reguladas pela Resolução nº 680/2017 (Regulamento sobre Equipamentos de Radiocomunicação de Radiação Restrita). Entre as principais faixas que se destacam para utilização no Brasil de tais tecnologias estão as de 902-907,5 MHz e 915-928 MHz (ANATEL, 2020).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

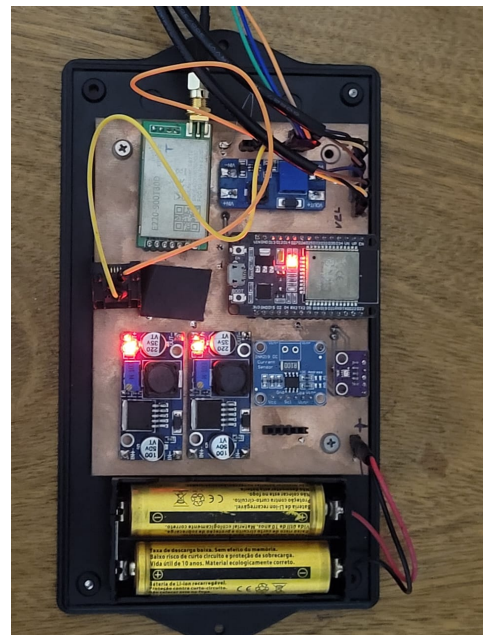
Neste capítulo são apresentados os componentes, sensores, plataformas de desenvolvimento e a descrição de hardware e software utilizados na implementação deste projeto.

No apêndice A deste trabalho estão disponíveis os esquemáticos dos dois circuitos projetados, que foram implementados utilizando o *software* de projetos eletrônicos KiCad 8.0. As Figuras 12 e 13 apresentam imagens dos protótipos dos circuitos transmissor e receptor montados em PCIs (placas de circuito impresso) e que foram utilizados durante os testes deste trabalho.

Figura 12 – Circuito transmissor implementado



(a) Estrutura montada



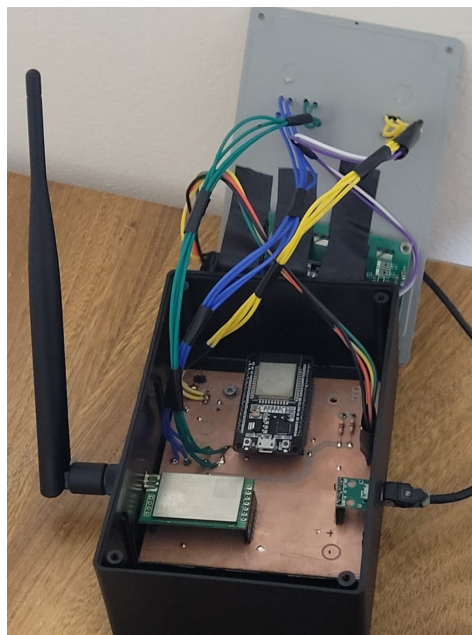
(b) Circuito aberto

Fonte: Autor.

Figura 13 – Circuito receptor implementado



(a) Fora



(b) Dentro

Fonte: Autor.

A seguir nos Quadros 2 e 3 apresentam as especificações do protótipo e os materiais necessários para sua implementação, respectivamente.

Quadro 2 – Especificações do protótipo

Medição	Faixa de medição	Precisão
Temperatura	-40°C a 80°C	$\pm 0,5^\circ\text{C}$
Umidade	0 a 100%	$\pm 2\%$
Pressão	300 a 1100 hPa	$\pm 0,12 \text{ hPa}$
Precipitação	-	$\pm 0,454 \text{ mm}$
Velocidade do vento	0 a 30 m/s	$\pm 0,1 \text{ m/s}$
Direção do vento	8 direções	-

Fonte: Usinainfo; MakerHero; AliExpress.

Quadro 3 – Lista de materiais

Dispositivo	Modelo	Quant.	Valor un.
Microcontrolador	ESP32 DEVKIT V1	2	R\$ 48,90
Sensor de Umidade e Temperatura	DHT22	1	R\$ 33,81
Barômetro	BMP280	1	R\$ 5,90
Pluviômetro	MS-WH-SP-RG	1	R\$ 50,80
Sensor de Velocidade do Vento	ZTS-3000-FSJT-V05	1	R\$ 125,99
Sensor de Direção do Vento	PR-3000-FXJT-V05	1	R\$ 114,59
Sensor de Tensão e Corrente	INA219	1	R\$ 14,60
Módulo LoRa 915 MHz	E220-900T30D	2	R\$ 45,43
Antena 915 MHz	TX915-XPL-100	1	R\$ 18,54
Antena 915 MHz	TX915-JK-20	1	R\$ 17,45
Módulo Step Down	LM2596	2	R\$ 7,90
Módulo Step Up	SDB628	1	R\$ 7,90
Bateria (Li-ion)	18650 (9800 mAh)	2	R\$ 12,15
Display LCD	16x2 I2C	1	R\$ 19,90
TOTAL			R\$ 638,24

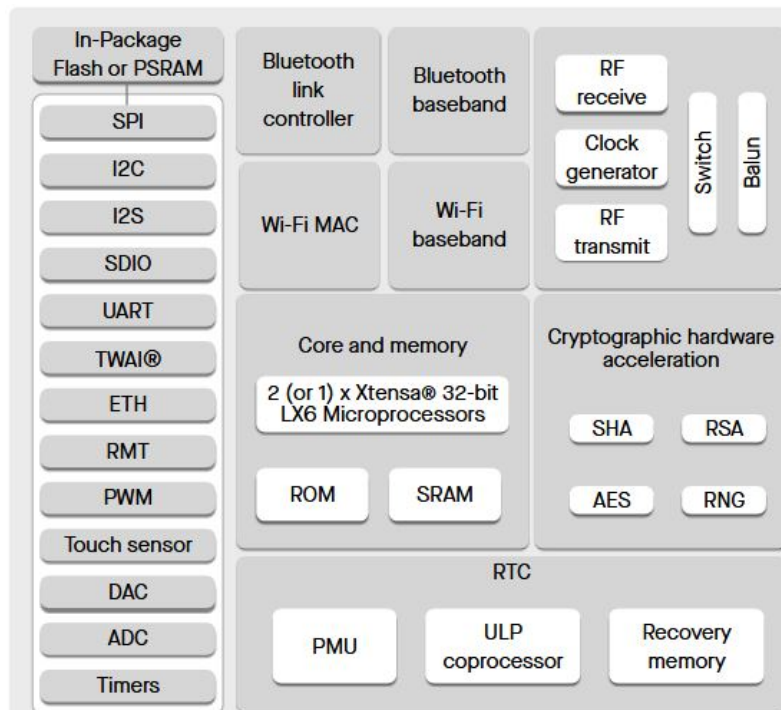
Fonte: Usinainfo; MakerHero; AliExpress.

3.1 Microcontrolador

O microcontrolador escolhido para este projeto foi um módulo ESP32 que é um microcontrolador muito popular de baixo custo e baixo consumo de energia, desenvolvido pela Espressif Systems, e que incorpora diversos recursos, incluindo módulos de conexão Wi-Fi e Bluetooth integrados em seu chip, e por este motivo ele é muito utilizado em projetos de IoT, robótica e automação.

Na Figura 14 é apresentado o diagrama de blocos de um ESP32, que pode possuir *single/dual* core de 32 bits, RTC (*Real Time Clock*) interno, conexão *Wi-fi* e *bluetooth*, diversos periféricos como conversores A/D (*analog to digital*) e D/A (*digital to analog*), comunicação UART, I2C, SPI, pinos de GPIOs (*General Purpose Input/Output*), dentre outros.

Figura 14 – Diagrama de blocos interno do ESP32



Fonte: (ESPRESSIF, 2025).

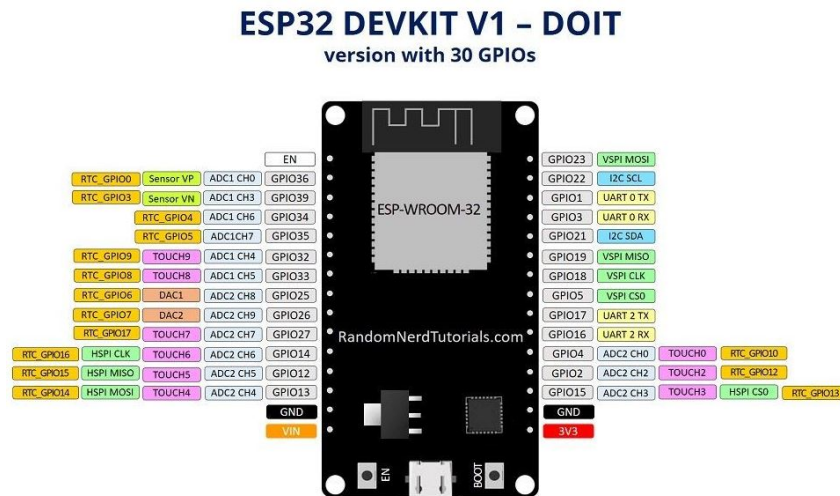
O módulo escolhido para este projeto foi o ESP32 Devkit V1 na versão com 30 pinos, a Figura 15 apresenta uma imagem deste módulo, e na Figura 16 é apresentado o seu *pinout*.

Figura 15 – Módulo ESP32 DevKit V1



Fonte: (Usinainfo, 2025a).

Figura 16 – Pinagem do módulo ESP32 DevKit V1



Fonte: (Usinainfo, 2025a).

3.2 Sensores

Nesta seção são apresentados os sensores utilizados na implementação deste projeto.

3.2.1 Sensor de Temperatura e Umidade - DHT22

O sensor escolhido para a medição de umidade e temperatura foi o módulo AM2302 DHT22 apresentado na Figura 17, sendo um dispositivo eletrônico amplamente utilizado para medir e monitorar os níveis de umidade e temperatura em ambientes diversos. É considerado um sensor confiável e preciso, comumente empregado em projetos de automação residencial, sistemas de climatização, controle de umidade em estufas, entre outros. (Usinainfo, 2025b) Este sensor foi escolhido para este projeto por realizar a medição de duas variáveis e por ser preciso, possuindo precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para temperatura e de até $\pm 5\%$ para umidade.

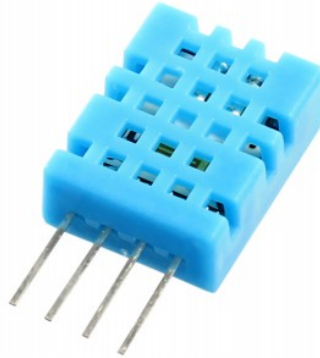
Figura 17 – Módulo AM2302 DHT22



Fonte: (Usinainfo, 2025b).

Outra opção semelhante disponível no mercado com um preço mais acessível é o sensor de umidade e temperatura DHT11 apresentado na Figura 18, que é uma versão mais simples e menos precisa do DHT22.

Figura 18 – Sensor DHT11



Fonte: (Usinainfo, 2025e).

Na Tabela 1 é apresentada uma comparação entre os parâmetros destes dois sensores.

Tabela 1 – Especificações DHT22 e DHT11

	DHT22	DHT11
Tensão de alimentação	3-5,5V	3-5,5V
Faixa de Corrente	0,5-2,5mA	0,5-2,5mA
Faixa de Umidade	0 a 100%	20 a 90%
Margem de Erro	± 2 a 5% RH/ $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$	$\pm 4\%$ RH/ $\pm 2^{\circ}\text{C}$
Comunicação	One-wire	One-wire
Preço	R\$ 32,12	R\$ 7,27

Fonte: (Usinainfo, 2025b) (Usinainfo, 2025e).

Para este projeto o sensor DHT22 foi alimentado com uma tensão de 3,3V e a leitura de suas medições foi realizada pelo pino GPIO26 do ESP32, como apresentado no Quadro 4

Quadro 4 – Conexões do DHT22

DHT22	ESP32
VCC	3,3V
GND	GND
DAT	GPIO26

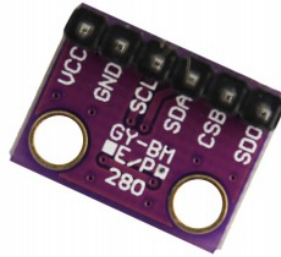
Fonte: Autor.

3.2.2 Sensor de Pressão - BMP280

O sensor escolhido para medição de pressão foi o BMP280 apresentado na Figura 19, este componente é um módulo eletrônico capaz de realizar a medição de pressão atmosférica

e temperatura. Também conhecido como barômetro é um módulo digital de alta capacidade e resolução, utilizado nas mais diversas aplicações junto a microcontroladores, entre eles, o Arduino (Usinainfo, 2025c).

Figura 19 – Módulo sensor BMP280



Fonte: (Usinainfo, 2025c).

Na tabela 2 são apresentadas as especificações do BMP280.

Tabela 2 – Especificações BMP280

	BMP280
Tensão de operação	3,3V
Faixa de Temperatura	-40 a 85°C
Faixa de Pressão	300 a 1100hPa
Margem de Erro	$\pm 1^\circ\text{C}/\pm 0,12\text{hPa}$
Comunicação	I2C e SPI

Fonte: (Usinainfo, 2025c).

Na implementação deste projeto o sensor BMP280 foi utilizado somente para a leitura da pressão atmosférica, utilizando a comunicação I2C, o Quadro 5 apresenta as conexões do sensor.

Quadro 5 – Conexões do BMP280

BMP280	ESP32
VCC	3,3V
GND	GND
SCL	GPIO22
SDA	GPIO21
CSB	-
SDO	-

Fonte: Autor.

Por este módulo também realizar medições de temperatura ele pode ser uma outra opção que pode ser utilizada no monitoramento da temperatura ambiente em projetos mais simples, apesar de possuir uma precisão menor que o DHT22.

3.2.3 Pluviômetro - MS-WH-SP-RG

Este é um sensor que mede a precipitação da chuva, que consiste em um recipiente que armazena uma quantidade de água da chuva, e quando este valor é excedido ele libera a quantidade de água armazenada e fecha um contato eletrônico, e após esvaziar, o contato se abre novamente. O sensor possui um conector RJ11 6P2C (6 posições, 2 contatos). Um contato do sensor é conectado ao 3,3 V e o outro ao pino GPIO27 do ESP32 com um resistor pull-down de 10 $k\Omega$. A Figura 20 apresenta uma imagem do sensor utilizado.

Figura 20 – Sensor de precipitação de chuva



Fonte: AliExpress.

Para a calibração do sensor foi utilizada uma seringa para a medição do volume de água a ser aplicado no sensor, e aplicando diferentes volumes de água foi medido o número de pulsos gerados pelo sensor. Os dados da calibração são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Dados para calibração do sensor de chuva

Volume de água (ml)	Pulsos	Volume/pulso
5	2	2,5
10	4	2,5
15	6	2,5
20	9	2,22
25	10	2,5
30	12	2,5
35	13	2,69
40	16	2,5
50	20	2,5

Fonte: Autor.

Após as medições foi possível constatar que cada pulso do sensor equivalem a 2,5 ml de água, e que a precisão do sensor é de $\pm 2,5$ ml. Para converter o volume de água

medido em mililitros para precipitação de chuva em milímetros foi usada a equação a seguir:

$$p = 10 \times \frac{V}{A} \quad (3.1)$$

- p: Precipitação de chuva (mm)
- V: Volume de água (ml)
- A: Área de recepção de chuva (cm^2)

A área de recepção do sensor é de 55 cm^2 (11 cm x 5 cm), dessa forma aplicando a equação anterior para 2,5 ml obteve-se que a medição desse sensor é de aproximadamente 0,454 mm de chuva por pulso medido, com precisão de $\pm 0,454 \text{ mm}$.

3.2.4 Sensor de Velocidade do Vento - ZTS-3000-FSJT-V05

No mercado há diferentes tipos de sensores que medem a velocidade do vento, com diferentes tipos de saídas, alguns transmitem os dados pelo protocolo de comunicação RS485, outros apresentam em sua saída um valor de tensão ou corrente proporcional a velocidade do vento medida. O modelo escolhido foi o sensor de velocidade do vento ZTS-3000-FSJT-V05 que possui em sua saída uma tensão analógica que varia de 0 a 5 V, sendo proporcional a velocidade medida.

Para conectar a saída deste sensor ao ESP32 foi utilizado um divisor resistível com dois resistores de $10 \text{ k}\Omega$ para reduzir a tensão aplicada ao ESP32 para no máximo 2,5 V. Para realizar a medição dessa tensão foi utilizado o conversor A/D (analógico para digital) do pino GPIO32 do ESP32 com uma resolução de 12 bits. O sensor utilizado é apresentado pela Figura 21.

Figura 21 – Sensor de Velocidade do Vento

0-5V Output Wind Speed



Fonte: AliExpress.

Na Tabela 4 são apresentadas as especificações do sensor de velocidade do vento.

Tabela 4 – Especificações do Sensor de Velocidade do Vento

	ZTS-3000-FSJT-V05
Tensão de operação	10V a 30V
Tensão de saída	0-5V
Faixa de Medição	0-30 m/s
Resolução	0,1 m/s

Fonte: AliExpress.

No Quadro 6 são apresentadas as conexões do sensor no circuito.

Quadro 6 – Conexões do Sensor de Velocidade do Vento

ZTS-3000-FSJT-N01	ESP32
Vin+	12V
Vin-	GND
Vout+	divisor resistivo(GPIO32)
Vout-	GND

Fonte: Autor.

3.2.5 Sensor de Direção do Vento - PR-3000-FXJT-V05

O sensor utilizado para medir a direção do vento neste projeto foi o PR-3000-FXJT-V05, um sensor que consegue medir 8 direções diferentes, variando sua resistência interna e aplicando em sua saída oito valores de tensão entre 0 e 5 V para indicar cada posição, o

que possibilita a medição dos pontos cardeais e colaterais. O sensor utilizado é apresentado na Figura 22.

Figura 22 – Sensor de direção do vento



Fonte: AliExpress.

Na Tabela 5 são apresentadas as especificações do sensor de direção do vento.

Tabela 5 – Especificações do Sensor de Direção do Vento

	PR-3000-FXJT-V05
Tensão de operação	10V a 30V
Tensão de saída	0-5V
Direções	8
Resolução	-

Fonte: AliExpress.

No projeto o sensor de direção foi conectado da mesma maneira que o sensor de velocidade do vento, utilizando um divisor de tensão com dois resistores de $10\text{ k}\Omega$, seguindo as conexões conforme é apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 – Conexões do Sensor de Direção do Vento

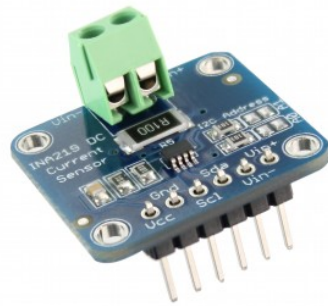
PR-3000-FXJT-V05	ESP32
Vin+	12V
Vin-	GND
Vout+	divisor resistivo (GPIO33)
Vout-	GND

Fonte: Autor.

3.2.6 Sensor de Tensão e Corrente - INA219

O módulo INA219 apresentado na Figura 23 foi o sensor escolhido para realizar o monitoramento das condições de tensão e corrente das baterias utilizadas no protótipo do circuito transmissor. Este módulo possui um conversor analógico digital com resolução de 12 bits para realizar medições de tensão, e para medir corrente o módulo utiliza um resistor *shunt* de 100 m Ω que é colocado entre a fonte de alimentação e a carga, e realiza a medição da tensão sobre esse resistor. O sensor utiliza uma interfase de comunicação I2C.

Figura 23 – Sensor de Tensão e Corrente INA219



Fonte: (Usinainfo, 2025d).

Na Tabela 6 são apresentadas as especificações do sensor.

Tabela 6 – Especificações INA219

	INA219
Tensão de alimentação	3,3V a 5V
Faixa de Tensão	0 a 26V
Faixa de Corrente	0 a 3,2A
Margem de Erro	$\pm 0,1$ à $\pm 0,8$ mA
Comunicação	I2C

Fonte: (Usinainfo, 2025d).

O Quadro 8 apresenta as conexões do INA219 no ESP32.

Quadro 8 – Conexões do INA219

INA219	ESP32
VCC	3,3V
GND	GND
SCL	GPIO22
SDA	GPIO21
Vin-	-
Vin+	-

Fonte: Autor.

No circuito este módulo monitora a tensão das baterias que alimentam o circuito, dessa forma o pino Vin+ é conectado ao terminal positivo da bateria, e o pino Vin- é conectado aos pinos da tensão de entrada dos conversores DC/DC *step up* e *step down* que alimentam todo o circuito transmissor.

3.3 Módulo LoRa - E220-900T30D

Este módulo foi escolhido para realizar a transmissão e recepção de dados entre os dois circuitos, o motivo de sua escolha foi por ele ser um módulo simples de utilizar, que permite transmitir dados sem fio à alguns quilômetros de distância, e utiliza o protocolo de comunicação serial UART. Na Figura 24 é apresentado uma imagem deste módulo LoRa.

O E220-900T30D adota uma nova geração da tecnologia LoRa de espectro espalhado e um módulo de porta serial sem fio (UART) projetado com base no esquema de chip LLCC68. Ele possui uma variedade de métodos de transmissão, opera na faixa de frequência (850,125 ~ 930,125 MHz) (padrão 873,125 MHz), saída de nível TTL, compatível com tensões de porta IO de 3,3 V e 5 V (EBYTE, 2020).

Figura 24 – Módulo E220-900T30D



Fonte: (EBYTE, 2020).

Na Tabela 7 são apresentadas as especificações do módulo LoRa.

Tabela 7 – Especificações E220-900T30D

	E220-900T30D
Tensão de alimentação	3V a 5,5V
Tensão de comunicação	3,3V
Faixa de Frequência	850,125 a 930,125 MHz
Corrente de transmissão	620 mA
Corrente de recepção	17,2 mA
Distância	10 km
Comunicação	UART

Fonte: (EBYTE, 2020).

No Quadro 9 são apresentados as conexões do módulo nos dois circuitos implementados.

Quadro 9 – Conexões do E220-900T30D

E220-900T30D	Transmissor	Receptor
M0	GPIO2	GPIO2
M1	GPIO4	GPIO4
RXD	GPIO17(TX2)	GPIO17(TX2)
TXD	GPIO16(RX2)	GPIO16(RX2)
AUX	GPIO25	GPIO13
VCC	5V	5V
GND	GND	GND

Fonte: Autor.

Para o devido funcionamento dos módulos é necessário utilizar antenas, para isso foram utilizadas as antenas do modelo TX915-XPL-100 no módulo transmissor e TX915-JK-20 no módulo receptor, que são exemplos de antenas recomendadas no datasheet deste módulo LoRa.

Para realizar a configuração dos parâmetros de transmissão dos módulos foi utilizado o *software* disponibilizado pela EBYTE, fabricante do módulo, em conjunto com o conversor USB para serial apresentado na Figura 25.

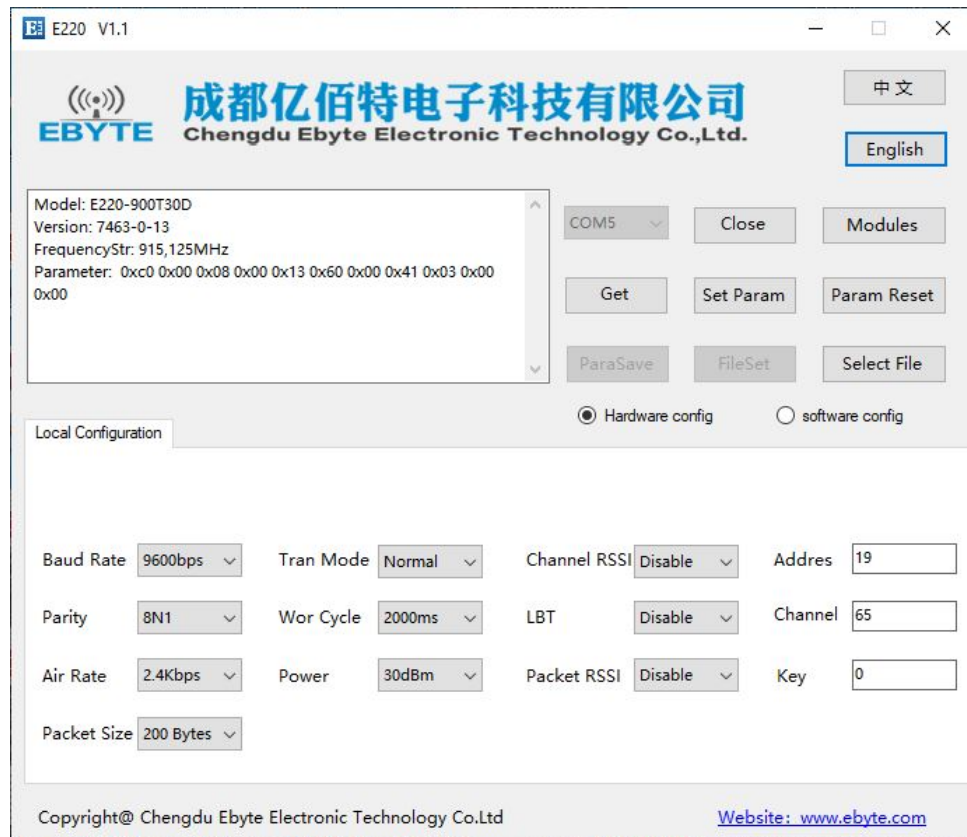
Figura 25 – Placa FTDI FT232RL - Conversor USB Serial



Fonte: (MakerHero, 2025a).

A Figura 26 apresenta uma imagem do *software* utilizado, e dos parâmetros de configuração utilizados nos módulos LoRa para este projeto.

Figura 26 – Software de configuração para módulos E220



Fonte: Autor.

3.4 Distribuição de energia

Com relação a distribuição de energia do projeto são apresentados nas figuras 29 e 30 os diagramas em blocos de energia dos circuitos transmissor e receptor, respectivamente.

O circuito transmissor é alimentado por duas baterias de íons de lítio (Li-ion) 18650 de 9800 mAh em série, proporcionando uma tensão de 6 V-8,4 V. Neste circuito foram utilizadas tensões de 3,3 V, 5 V e 12 V, para essa conversão foram utilizados os módulos LM2596 *step down* e SDB628 *step up*, apresentados pelas Figuras 27 e 28.

Figura 27 – Módulo Step Down LM2596



Fonte: (MakerHero, 2025b).

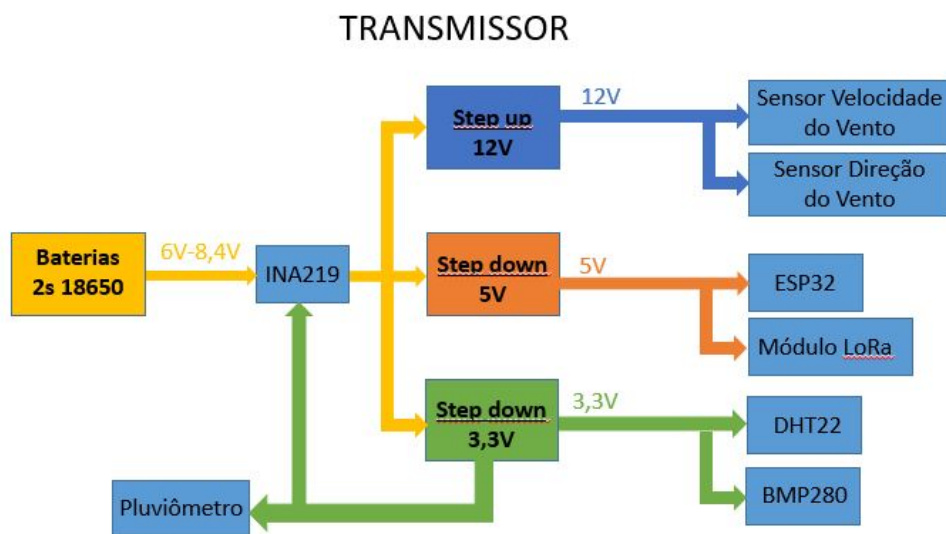
Figura 28 – Módulo Step Up SDB628



Fonte: (MakerHero, 2025c).

Na Figura 29 é apresentado o diagrama em blocos da distribuição de energia do circuito transmissor.

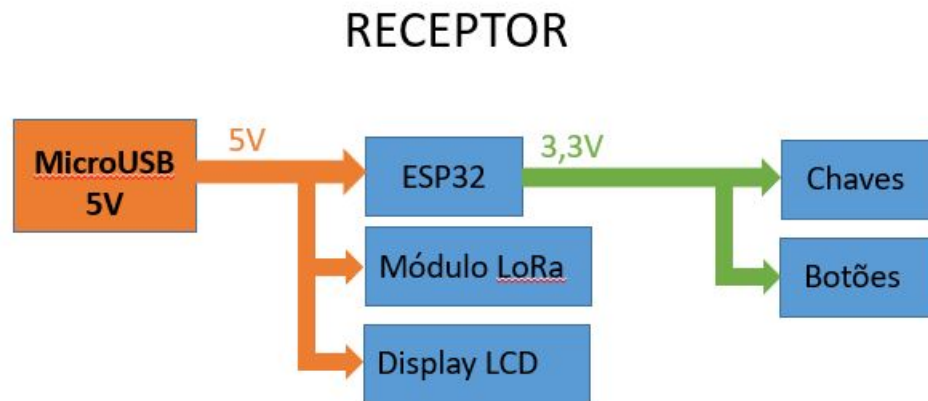
Figura 29 – Diagrama em blocos da distribuição de energia do circuito transmissor



Fonte: Autor.

O circuito receptor foi alimentado com uma tensão de 5 V por um conector micro USB, utilizando um carregador de celular, para alimentar o ESP32 e o módulo LoRa, e a tensão de 3,3 V da placa usada nos resistores de pull-up é proporcionada pelo regulador de tensão presente na placa do ESP32. O diagrama em blocos da distribuição de energia do circuito receptor é apresentado pela Figura 30.

Figura 30 – Diagrama em blocos da distribuição de energia do circuito receptor



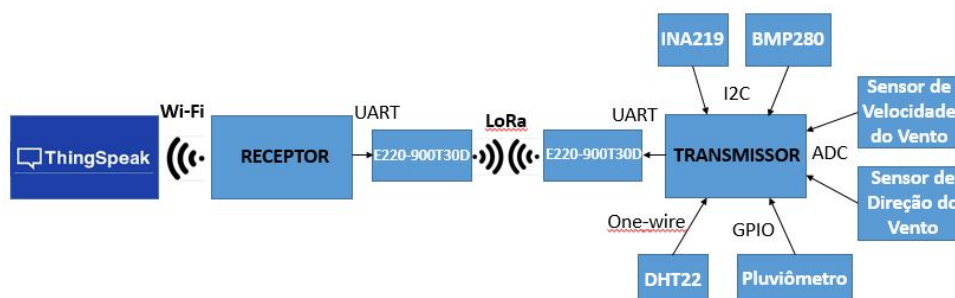
Fonte: Autor.

3.5 Software

Para implementação dos *softwares* do projeto foi utilizado o ambiente de desenvolvimento Arduino IDE, que é uma plataforma de desenvolvimento integrada que permite a programação de microcontroladores Arduino de maneira simples e eficiente em linguagem C/C++. O Arduino IDE também permite a programação de outros microcontroladores, como o ESP32, fazendo-se necessário a utilização da biblioteca ESP32 disponibilizada pela *Espressif Systems*.

Na Figura 31 é apresentado o diagrama do processo de comunicação entre os circuitos e seu fluxo de dados no projeto. Dessa forma o circuito receptor solicita os dados ao circuito transmissor, o qual após receber a solicitação realiza a leitura dos sensores e envia os dados coletados de volta para o receptor, e após a recepção desses dados eles são enviados via Wi-Fi para o *ThingSpeak*, que foi a plataforma IoT escolhida para o armazenamento e acesso remoto dos dados pela internet.

Figura 31 – Diagrama de fluxo de dados



Fonte: Autor.

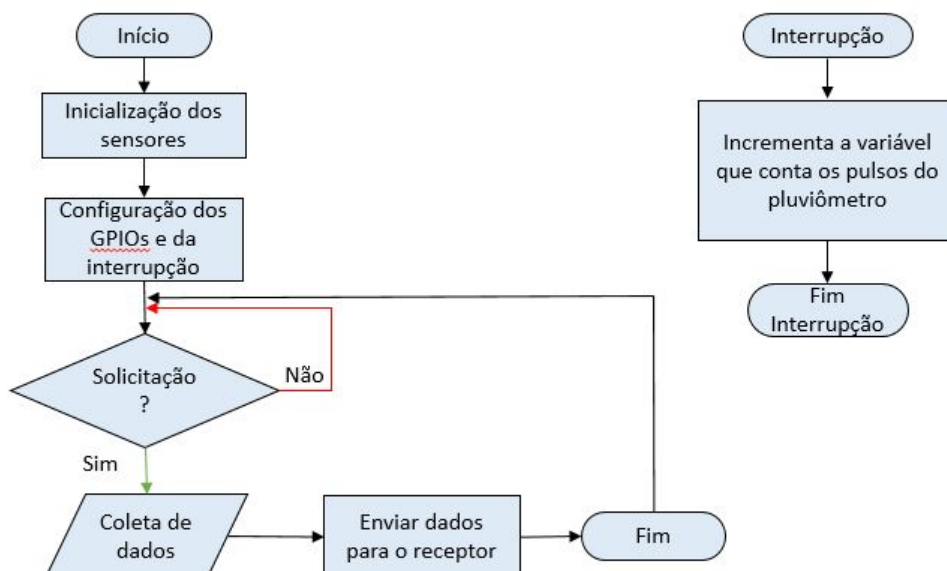
3.5.1 ThingSpeak

O *ThingSpeak* é um serviço de análise de IoT que permite agregar, visualizar e analisar fluxos de dados ao vivo na nuvem. O *ThingSpeak* fornece visualizações instantâneas de dados postados pelos seus dispositivos no *ThingSpeak*. Com a capacidade de executar código MATLAB no *ThingSpeak*, você pode executar análises on-line e processar dados conforme eles chegam. O *ThingSpeak* é frequentemente usado para prototipagem e sistemas de IoT de prova de conceito que exigem análises (MathWorks, 2025).

3.5.2 Fluxogramas

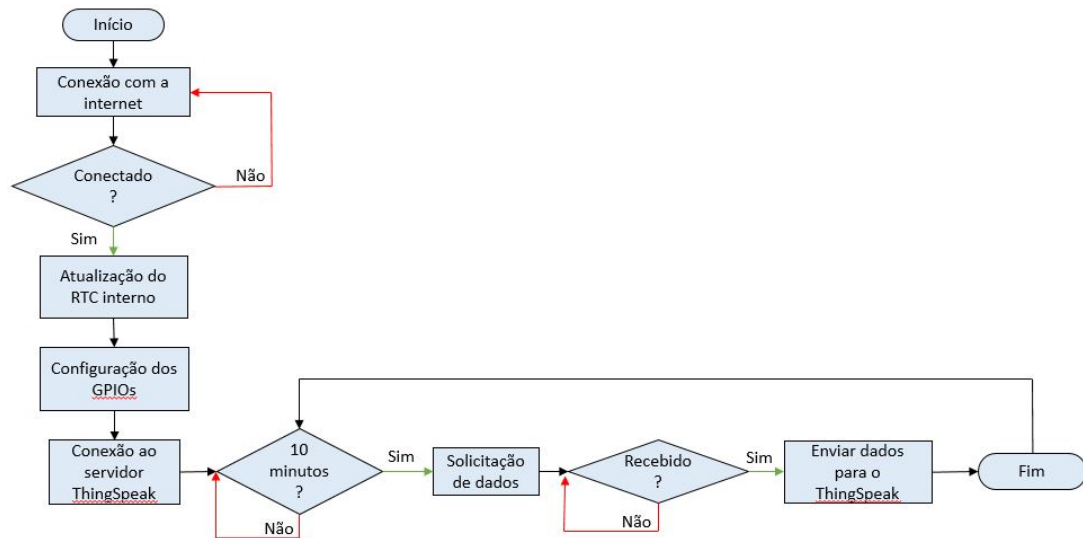
Para apresentar o funcionamento dos códigos utilizados nos circuitos foi implementado dois fluxogramas apresentados nas Figuras 32 e 33 que demonstram o funcionamento do *software* de cada circuito.

Figura 32 – Fluxograma do software do circuito transmissor



Fonte: Autor.

Figura 33 – Fluxograma do software do circuito receptor



Fonte: Autor.

O *software* dos circuitos funcionam da seguinte forma, o circuito receptor se conecta a uma rede Wi-Fi, e atualiza o seu RTC (*Real Time Clock*) interno com a data e hora do local, realiza as configurações dos pinos de GPIO, se conecta ao servidor do *ThingSpeak*, e após esse processo de inicialização o circuito realiza solicitações de dados para o circuito transmissor com intervalos 10 minutos, e ao receber os dados solicitados o circuito os envia para o servidor do *ThingSpeak*.

Já o circuito transmissor após ser ligado realiza a configuração e inicialização dos sensores, pinos de GPIO e interrupção, e em seguida o circuito aguarda a solicitação de dados. Quando solicitado, o circuito realiza a leitura de todos os sensores e da variável responsável por armazenar as medições do pluviômetro, que é incrementada por uma interrupção, finalizada a leitura os dados são enviados para o receptor, e o circuito volta a aguardar uma nova solicitação de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

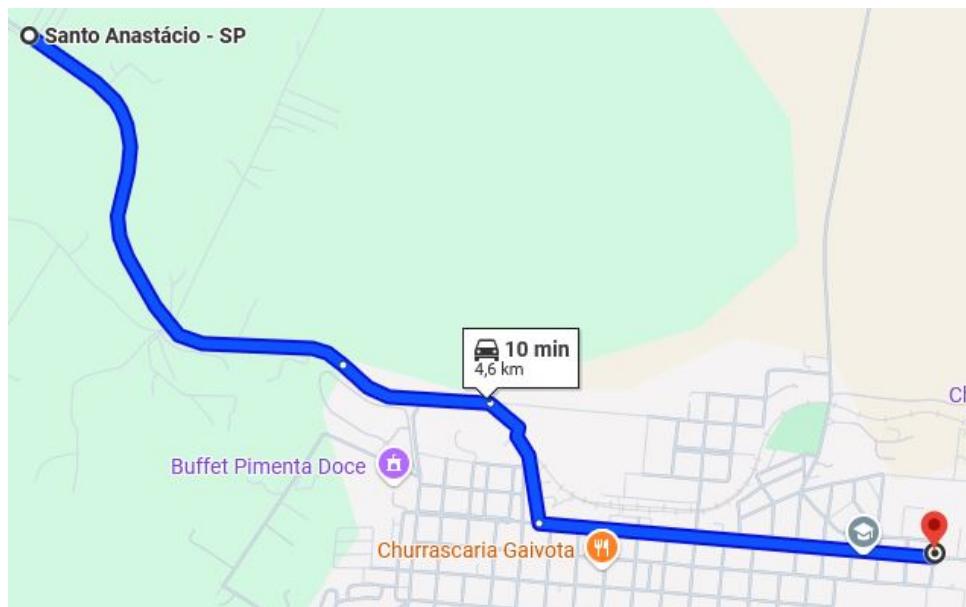
Neste capítulo são apresentados os testes realizados para a comprovação do funcionamento e desempenho da estação meteorológica projetada.

4.1 Teste de distância

Este primeiro teste foi realizado para verificar a máxima distância possível entre os dois circuitos, mantendo uma transmissão e recepção de dados aceitável.

Para a realização deste teste o circuito transmissor foi posicionado em um local fixo, e realizando a transmissão do valor de uma variável do tipo inteira que era incrementada a cada 2 segundos, enquanto o circuito receptor foi movido para longe do outro circuito enquanto era realizado o monitoramento do valor da variável recebida, que era escrita em um *display* LCD. Dessa forma foi medida a maior distância possível entre os circuitos, que mantivesse a recepção de dados. Na Figura 34 é mostrado uma imagem no Google Maps dos pontos em que se localizavam os dois circuitos quando medida a distância máxima de transmissão.

Figura 34 – Distância máxima entre transmissor e receptor



Fonte: Autor.

A maior distância em linha reta medida entre os circuitos foi de 4 km, mantendo uma recepção de dados fraca, onde o circuito receptor começou a perder grande parte dos dados que eram transmitidos. Durante o teste também houveram momentos no meio do trajeto da Figura 34 em que houve perda dos dados transmitidos. Durante o teste também

foi possível obter uma ótima transmissão de dados com uma distância de 2,5 km, sem apresentar perda de dados.

4.2 Teste de consumo

Este teste consistiu na medição do consumo de corrente do circuito transmissor para diferentes valores de tensão, variando de 8,4 V à 6 V utilizando uma fonte de bancada para simular a tensão das baterias, e com estes dados de consumo estimar o tempo que o circuito se manteria em funcionamento e se as baterias escolhidas atendem as necessidades do projeto. Na Tabela 8 são apresentados os consumos de corrente do circuito utilizando todos os sensores para diferentes tensões da bateria.

- I_s : Corrente de entrada do circuito em *stand-by*.
- I_m : Corrente de entrada do circuito durante medição dos sensores.
- I_t : Corrente de entrada do circuito durante transmissão dos dados via LoRa.

Tabela 8 – Consumo do circuito transmissor com todos os sensores

Tensão (V)	I_s (mA)	I_m (mA)	I_t (mA)
8,4	115	127	683
8	121	136	720
7,4	131	147	782
6,8	142	160	850
6	162	181	753

Fonte: Autor.

Para as medições da Tabela 9 foram removidos os sensores de velocidade e direção do vento, e o pluviômetro.

Tabela 9 – Consumo do circuito transmissor com metade dos sensores

Tensão (V)	I_s (mA)	I_m (mA)	I_t (mA)
8,4	57	72	535
8	60	75	557
7,4	64	80	602
6,8	69	86	654
6	79	98	611

Fonte: Autor.

Nas medições da Tabela 10 foram utilizados os mesmos sensores que na tabela anterior, mas agora mantendo o ESP32 no modo *Deep Sleep* durante os períodos em *stand-by*.

Tabela 10 – Consumo do circuito transmissor com metade dos sensores e o ESP32 em *Deep Sleep*

Tensão (V)	I_s (mA)	I_m (mA)	I_t (mA)
8,4	30	58	563
8	31	62	588
7,4	33	66	637
6,8	35	71	691
6	39	81	657

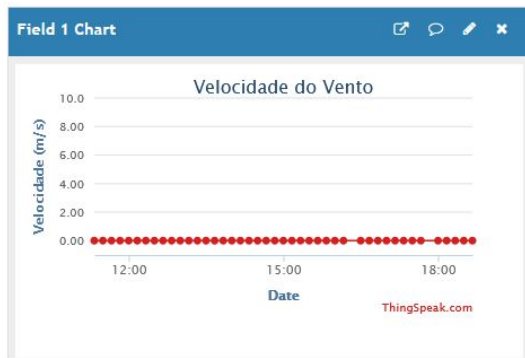
Fonte: Autor.

Com os dados medidos é possível observar uma expressiva diferença no consumo do circuito quando utilizando os sensores de velocidade e direção do vento, e outra diferença no consumo é a utilização do ESP32 em modo *Deep Sleep* durante os períodos em que o circuito está em *stand-by* aguardando para realizar as medições e transmissão dos dados.

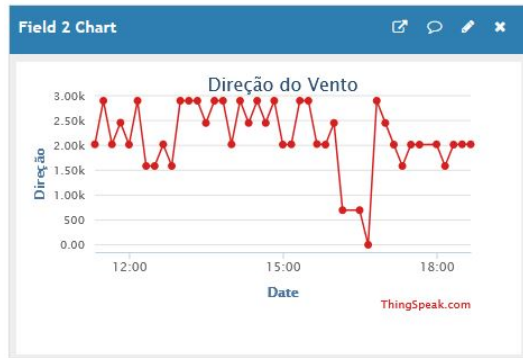
4.3 Teste em campo

Neste teste o circuito foi posicionado em um terreno no qual queria ser monitorado as condições climáticas do local durante o maior período possível realizando medições a cada 10 minutos, para observação de como o circuito se comporta estando exposto às condições climáticas, e comprovar se as baterias selecionadas atendem o funcionamento do circuito durante um período de pelo menos 24 horas sem precisarem ser carregadas.

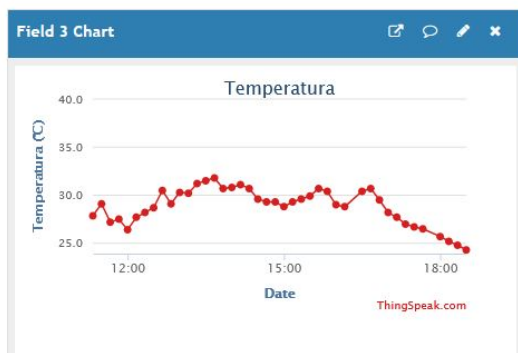
No teste foi utilizado a configuração referente a Tabela 8, utilizando todos os sensores e não usando o modo de economia de energia do ESP32 (*Deep Sleep*), e o circuito transmissor realizando uma medição de cada sensor apenas a cada 10 minutos com a solicitação do circuito receptor. Os dados medidos pelo circuito transmissor referente ao teste no dia 03/05/2025 em Santo Anastácio - SP são apresentados pela Figura 35.

Figura 35 – Gráficos *ThingSpeak* - Teste em campo

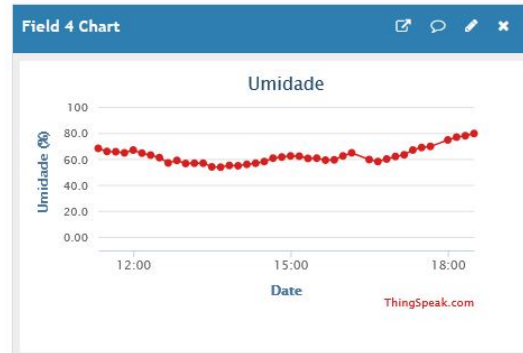
(a) Velocidade do vento



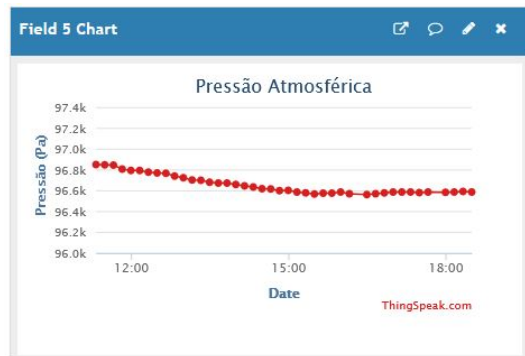
(b) Direção do vento



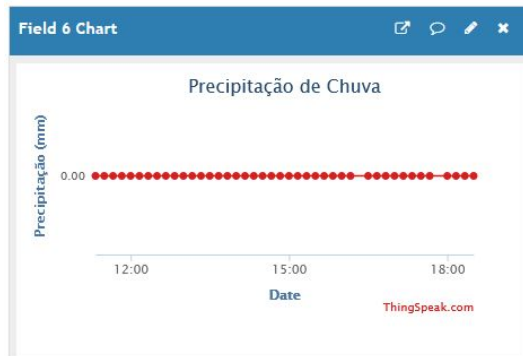
(c) Temperatura



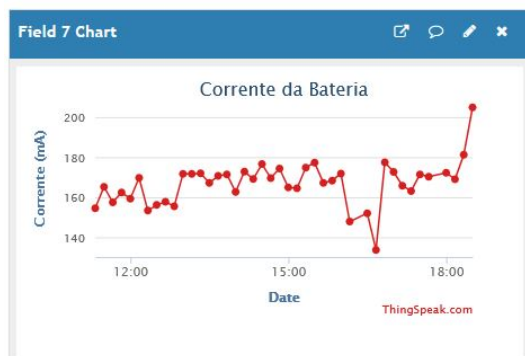
(d) Umidade



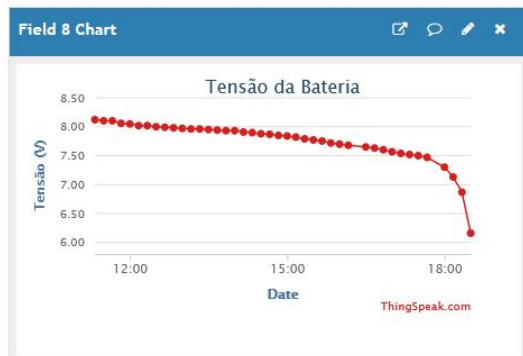
(e) Pressão Atmosférica



(f) Precipitação de Chuva



(g) Corrente da Bateria



(h) Tensão da Bateria

Fonte: Autor.

A Tabela 11 apresenta os valores medidos pelo sensor de direção do vento e os pontos cardiais e colaterais referentes a cada medição do sensor.

Tabela 11 – Conversão das medições em direções

Direção	Valor Medido
Norte	0
Nordeste	268
Leste	700
Sudeste	1145
Sul	1590
Sudoeste	2020
Oeste	2450
Noroeste	2900

Fonte: Autor.

A Figura 36 apresenta a previsão do tempo de em Santo Anastácio no dia 03/05/2025 disponível no site do ClimaTempo.

Figura 36 – Previsão do Tempo Santo Anastácio - 03/05/2025



Fonte: ClimaTempo.

O teste realizado teve uma duração de pouco mais de 7 horas até acabar a carga das baterias, tendo início às 11:20 e sendo finalizado às 18:30. Com as medições do teste foi possível perceber na Figura 35a que o sensor de velocidade do vento não realizou nenhuma medição, isso provavelmente ocorreu devido a posição em que foi realizado o teste, e pelo fato de o circuito realizar apenas uma medição do sensor a cada dez minutos, que pode ter causado interferência nas medições. Na Figura 35f a medição de precipitação de chuva também apresentou valores zero, pois não houve chuva no dia da medição.

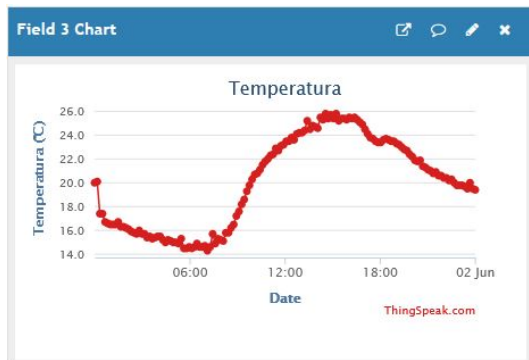
4.4 Teste em Deep Sleep

Devido ao resultado da duração das baterias no teste anterior foi realizado este teste para a obtenção de um melhor desempenho e duração das baterias, reduzindo o consumo do ESP32 utilizando o modo *Deep Sleep* disponível no microcontrolador, para reduzir o seu consumo de energia nos períodos em que aguarda o tempo para realizar a leitura dos sensores.

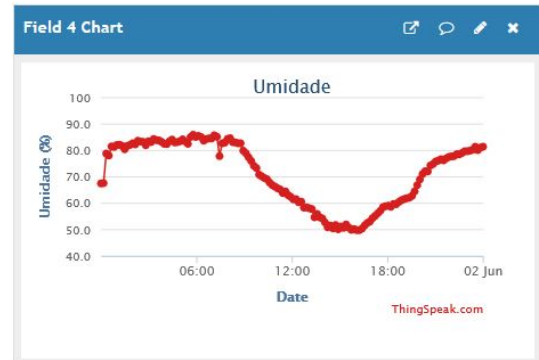
Neste teste foi utilizada a mesma configuração da Tabela 10, em que foram realizadas apenas medições de temperatura, umidade, pressão, tensão e corrente das baterias, e foi utilizado o modo *Deep Sleep* no ESP32. Para o teste o circuito transmissor foi colocado em *sleep* e a cada 10 minutos seu *timer* interno despertava o circuito, que realizava a leitura dos sensores e enviava os dados ao circuito receptor e voltava para o modo *sleep*, já o circuito receptor apenas aguardava o envio dos dados, e após recebe-los realizava o envio para o servidor do *ThingSpeak*.

Na Figura 37 são apresentados os dados medidos durante o teste, que foi realizado no dia 01/06/2025 em Campinas-SP e que teve uma duração de 24 horas. Ao fim do teste a tensão das baterias caíram apenas de 8,25 V para 7,62 V.

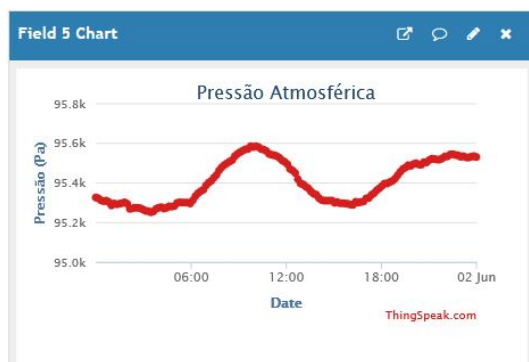
Figura 37 – Gráficos *ThingSpeak* - Teste em Deep Sleep



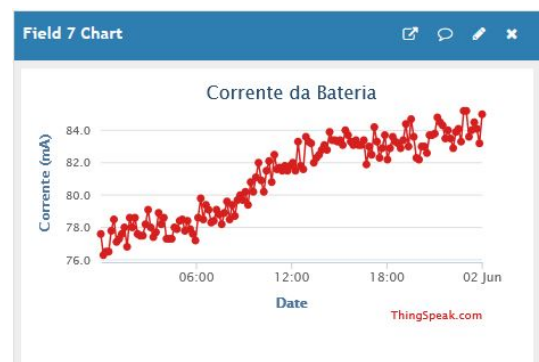
(a) Temperatura



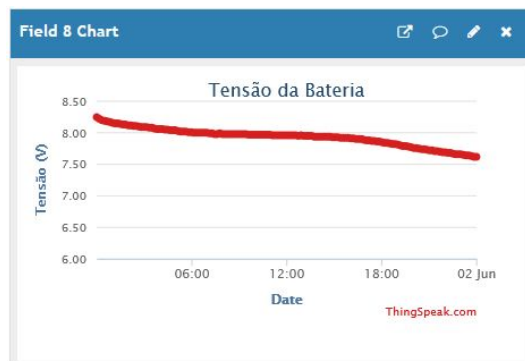
(b) Umidade



(c) Pressão Atmosférica



(d) Corrente da Bateria



(e) Tensão da Bateria

Fonte: Autor.

Na Figura 38 é apresentada a previsão do tempo do dia 01/06/2025 em Campinas - SP disponível no ClimaTempo.

Figura 38 – Previsão do Tempo Campinas - 01/06/2025



Fonte: ClimaTempo.

Na Tabela 12 é apresentada uma breve comparação dos valores máximos e mínimos de temperatura e umidade da previsão do tempo e das medições realizadas pelo circuito.

Tabela 12 – Comparação da previsão do tempo e da

	Previsão	Medição	Diferença Percentual
Temperatura Máxima	27°C	25,8°C	4,4%
Temperatura Mínima	12°C	14,3°C	19,2%
Umidade Máxima	91%	86%	5,5%
Umidade Mínima	34%	49,8%	46,5%

Realizando a comparação das variáveis foi possível perceber variações expressivas entre os valores da previsão do tempo e os valores medidos de temperatura e umidade. Considerando a precisão dos sensores utilizados é possível observar que os valores da previsão do tempo não representam de forma fiel as condições reais do clima para todas as localizações, isso se deve ao fato de os valores da previsão serem valores médios de grandes áreas territoriais, nesse caso valores para toda cidade de Campinas, que são medidos por satélite. Dessa forma a utilização de estações meteorológicas como essa se mostram necessárias para a produção agrícola de precisão, em que é necessário monitorar as condições climáticas de locais de médio e pequeno porte, garantindo medições mais próximas dos valores reais do local.

5 CONCLUSÃO

Com base nos testes realizados e na precisão dos sensores utilizados, foi possível verificar que o circuito implementado, conseguiu realizar medições de cinco das seis variáveis propostas no início deste trabalho, sendo elas, temperatura, umidade, pressão, precipitação e direção do vento, falhando somente na medição da velocidade do vento devido ao posicionamento do sensor e na forma como a coleta de dados foi realizada, ocorrendo apenas a cada 10 minutos.

Durante o teste de distância foi obtido uma distância máxima de 4 km entre os circuitos, mas como houveram perdas nos dados transmitidos, é recomendado manter uma distância de até 2,5 km para garantir uma boa recepção de dados, sem perda de informações. A realização deste teste comprovou que o circuito consegue se comunicar a distâncias de alguns quilômetros como o desejado no início do projeto.

Verificando a lista de componentes necessários para a implementação deste projeto obteve-se que o valor gasto para sua implementação foi de R\$638,24, um valor um pouco acima do que os gastos realizados pelos outros trabalhos analisados em referências bibliográficas, mas este trabalho se propunha implementar *hardware* e *software* de uma estação que realiza-se a medição de seis variáveis, enquanto outros trabalhos realizavam medições de apenas quatro variáveis. Mesmo possuindo um valor maior que outros trabalhos, sua implementação ainda possui um valor menor que outras opções encontradas no mercado, como a estação meteorológica WS-2902 da *Ambient Weather*, que está sendo vendida por R\$1.192,06.

Com relação ao consumo de energia e tempo de funcionamento do circuito transmissor o projeto atendeu ao objetivo inicial de manter a estação coletando dados por pelo menos 24 horas, mas isso só se mostrou possível utilizando o modo *Deep Sleep* do ESP32 e removendo os sensores de velocidade e direção do vento que chegavam a consumir até 73 mA, por esse motivo se mostrou necessário considerar o uso de baterias com maior capacidade do que as utilizadas.

Dessa forma, como proposta para projetos futuros, estão inclusos, a utilização de painéis fotovoltaicos para realizar o carregamento das baterias do circuito transmissor, permitindo o seu funcionamento por maiores períodos, e a utilização de mais sensores para realizar o monitoramento de outras variáveis que não foram incluídas neste trabalho como, irradiância solar, temperatura e umidade do solo, nível de radiação UV, dentre outros.

REFERÊNCIAS

AGRICULTURA 4.0: Inovação tecnológicas para o campo. **PESQUISA FAPESP**, 2020. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/agricultura-4-0/>. Acesso em: 20 maio 2025.

ANATEL. Cartilha orientativa internet das coisas - aspectos regulatórios da internet das coisas (iot) e dos sistemas de comunicação máquina a máquina. p. 15–16, 2020. Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/anexar-api/publico/anexos/download/a028ab5cc4e3f97442830bba0c8bd1dd>. Acesso em: 14 maio 2025.

AREZKI, R. Helping feed the world's fast-growing population. 2017. Disponível em: <https://www.imf.org/en/Blogs/Articles/2017/01/31/helping-feed-the-worlds-fast-growing-population#:~:text=Food%2Dcalorie%20production%20will%20have,spill%20over%20well%20beyond%20borders>. Acesso em: 19 maio 2025.

BAUTISTA-VIVANCO, D. Y. *et al.* Monitoreo remoto de variables ambientales a larga distancia con sistemas embebidos. **Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI**, v. 12, p. 40–48, 2024.

BEST, M. T. I. C. *i²c* client mode tb2669. 2019. Disponível em: <https://onlinedocs.microchip.com/oxy/GUID-CA6B1F8F-E09D-4780-A52A-CBBF61902464-en-US-4/GUID-6AC23131-D029-4AB0-985A-7B11B233F89A.html>. Acesso em: 6 maio 2025.

CANDIOTO, A. Agricultura paulista sente os primeiros efeitos das mudanças climáticas. **Jornal da USP - Campus Ribeirão Preto**, 2025. Disponível em: <https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/agricultura-paulista-sente-os-primeiros-efeitos-das-mudancas-climaticas/>. Acesso em: 19 maio 2025.

EBYTE. E220-900t30d user manual. 2020. Disponível em: https://cdn.awsli.com.br/945/945993/arquivos/E220-900T30D_UserManual_EN_v1.0.pdf. Acesso em: 13 maio 2025.

ESP32 UART Communication (Serial): Set Pins, Interfaces, Send and Receive Data (Arduino IDE). 2024. Disponível em: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-uart-communication-serial-arduino/>. Acesso em: 7 maio 2025.

ESPRESSIF. Esp32 series datasheet version 4.9. 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 12 maio 2025.

FIGUEIRÓ, M. N. Projeto e desenvolvimento de estação meteorológica com rtc e comunicação wi-fi. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2022.

GERMANO, S. B. *et al.* Protótipo de solução iot para uma estação meteorológica aplicando tecnologia lora no ambiente agro. Insitituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2022.

GOMES, J. A. Smart farming: O que é agricultura inteligente e quais as principais tecnologias já adotadas no brasil e eua? 2024. Disponível em: <https://agroadvance.com.br/blog-smart-farming-agricultura-inteligente/>. Acesso em: 19 maio 2025.

LLC, L. Lora: o que é essa solução para a conectividade das coisas. 2025. Disponível em: <https://logpyx.com/lora-solucao-para-conectividade-das-coisas/>. Acesso em: 14 maio 2025.

MAKERHERO. Placa ftdi ft232rl conversor usb serial. 2025. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/placa-ftdi-ft232rl-conversor-usb-serial/>. Acesso em: 14 maio 2025.

MAKERHERO. Regulador de tensão lm2596 step down. 2025. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/regulador-de-tensao-lm2596-conversor-dc-dc-step-down/>. Acesso em: 13 maio 2025.

MAKERHERO. Regulador de tensão sdb628 step up. 2025. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/conversor-boost-dc-step-up/>. Acesso em: 13 maio 2025.

MATHWORKS. Thingspeak. 2025. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/thingspeak.html>. Acesso em: 4 maio 2025.

MOREIRA, E. E. M. Desenvolvimento de uma miniestação meteorológica de baixo custo baseada na plataforma arduino. 2019.

ONS. Plano de operação energética (pen) 2024. p. 9, 2024. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/Relato%CC%81rio%20PEN%202024%20VF.pdf>. Acesso em: 18 maio 2025.

PEñA, E.; LEGASPI, M. G. Uart: A hardware communication protocol understanding universal asynchronous receiver/transmitter. 2020. Disponível em: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/uart-a-hardware-communication-protocol.html>. Acesso em: 7 maio 2025.

USINAINFO. Esp32 nodemcu iot com wifi e bluetooth - 30 pinos com cp2102. 2025. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/nodemcu/esp32-nodemcu-iot-com-wifi-e-bluetooth-30-pinos-com-cp2102-5147.html>. Acesso em: 12 maio 2025.

USINAINFO. Módulo sensor de umidade e temperatura am2302 dht22 -40 a 80°C. 2025. Disponível em: https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-umidade-arduino/modulo-sensor-de-umidade-e-temperatura-am2302-dht22-40-a-80c-4613.html?search_query=dht22&results=7. Acesso em: 12 maio 2025.

USINAINFO. Sensor de pressão e temperatura bmp280. 2025. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-pressao-arduino/sensor-de-pressao-e-temperatura-bmp280-4902.html#:~:text=O%20Sensor%20de%20Press%C3%A3o%20BMP280,%2C%20entre%20eles%2C%20o%20Arduino>. Acesso em: 12 maio 2025.

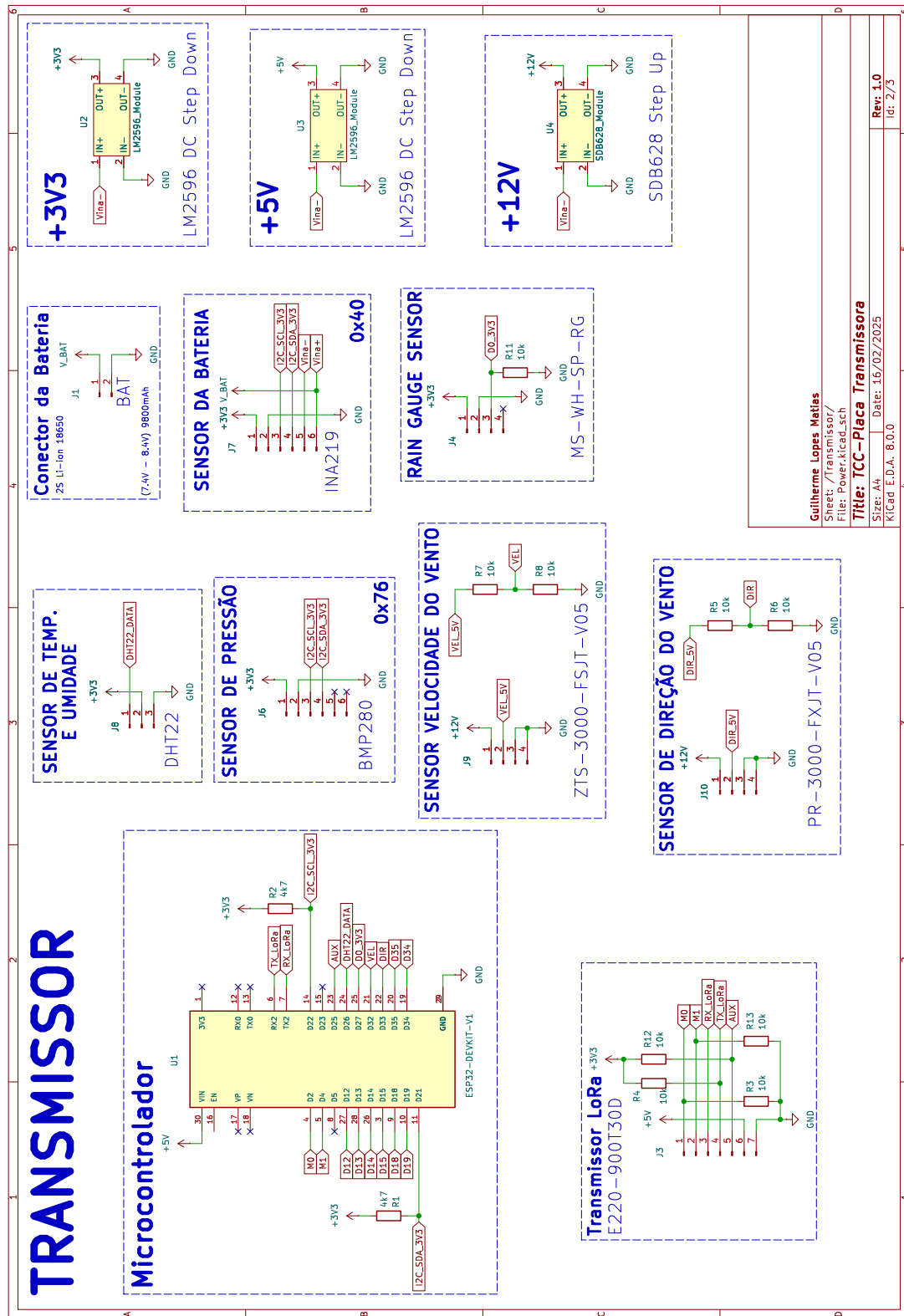
USINAINFO. Sensor de tensão e corrente ina219 de alta precisão. 2025. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-tensao-arduino/sensor-de-tensao-e-corrente-ina219-de-alta-precisao-4856.html>. Acesso em: 7 maio 2025.

USINAINFO. Sensor de umidade e temperatura dht11. 2025. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-umidade-arduino/sensor-de-umidade-e-temperatura-dht11-2823.html?srsltid=AfmBOOpWnYG3bIDruauZfeqgwlj4EoTEmezAM8MMUN2SJEkcKI8Pdxq>. Acesso em: 12 maio 2025.

VALDEZ, J.; BECKER, J. Understanding the i2c bus. **Texas instruments**, p. 8, 2015. Disponível em: <https://git.ondrovo.com/gex/gex-thesis/raw/commit/15c8640c15c2b77b8dfa2e873f72d4af7095a0d4/references/ti-understanding-i2c--slva704.pdf>. Acesso em: 6 maio 2025.

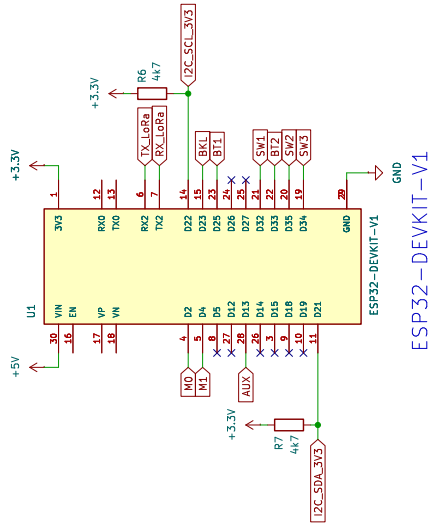
APÊNDICES

APÊNDICE A – ESQUEMÁTICO DOS CIRCUITOS TRANSMISSOR E RECEPTOR

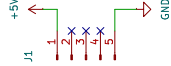


RECEPTOR

Microcontrolador

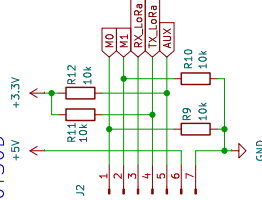


Power +5V

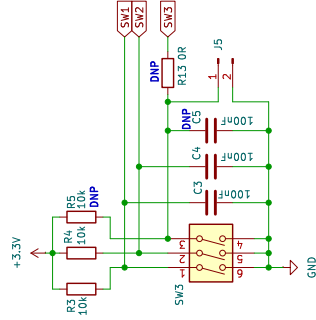


Conector Módulo Micro USB

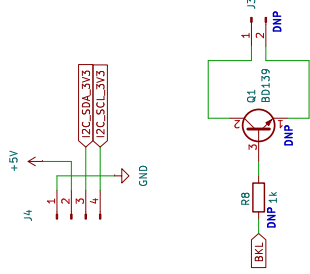
Transmissor LoRa E220-900T30D



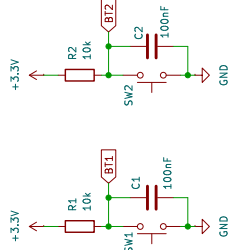
Chaves Seletoras



Display LCD (I2C)



Botões



Guilherme Lopes Matias

Sheet: /
File: TCC_11234-102_REC.kicad.sch

Title: TCC-Placa Receptora

Size: A4

Date: 16/02/2025

KiCad E.D.A. 8.0.0

Rev. 1.0

Id: 1/1