



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS QUIXADÁ
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

ISAAC VINÍCIUS DOS SANTOS SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM ECOSISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MONITORAMENTO CLIMÁTICO E AMBIENTAL NO SERTÃO CENTRAL DO
CEARÁ: UMA ABORDAGEM UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORA**

QUIXADÁ

2026

ISAAC VINÍCIUS DOS SANTOS SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM ECOSISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MONITORAMENTO CLIMÁTICO E AMBIENTAL NO SERTÃO CENTRAL DO CEARÁ:
UMA ABORDAGEM UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia de Computação do Campus Quixadá da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Computação.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos Filho.

Coorientador: Prof. Dr. Luís Gustavo Coutinho do Rêgo.

QUIXADÁ

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S58d Silva, Isaac Vinícius dos Santos.
Desenvolvimento de um ecossistema automatizado para monitoramento climático e ambiental no Sertão Central do Ceará : uma abordagem utilizando a tecnologia LoRa / Isaac Vinícius dos Santos Silva. – 2026.
108 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Curso de Engenharia de Computação, Quixadá, 2026.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos Filho.
Coorientação: Prof. Dr. Luís Gustavo Coutinho do Rêgo.
1. Internet das Coisas. 2. Monitoramento Climático. 3. LoRaWAN. 4. Pluviômetro Digital. 5. FIWARE.
I. Título.
-

ISAAC VINÍCIUS DOS SANTOS SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM ECOSISTEMA AUTOMATIZADO PARA
MONITORAMENTO CLIMÁTICO E AMBIENTAL NO SERTÃO CENTRAL DO CEARÁ:
UMA ABORDAGEM UTILIZANDO A TECNOLOGIA LORA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia de Com-
putação do Campus Quixadá da Universidade
Federal do Ceará, como requisito parcial à
obtenção do grau de bacharel em Engenharia de
Computação.

Aprovada em: 15/01/2026.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Helder Candido dos Santos
Filho (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Luís Gustavo Coutinho do
Rêgo (Coorientador)
Instituto Federal do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Elvis Miguel Galeas Stancanelli
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Paulo Armando Cavalcante Aguilar
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Me. Mauro César Cordeiro de Oliveira
Secretaria do Desenvolvimento Econômico do Ceará
(SDE)

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um ecossistema de Internet das Coisas, voltado para o monitoramento climático e ambiental no Sertão Central do Ceará. O sistema proposto consiste em um dispositivo de monitoramento de baixo custo, fabricado via impressão 3D e controlado pelo microcontrolador RP2040 (ARM Cortex-M0+), operando sobre uma arquitetura de rede LoRaWAN para transmissão de dados em longo alcance. O sistema realiza a coleta de temperatura, umidade e precipitação, transmitindo os dados para uma infraestrutura em nuvem baseada na plataforma FIWARE, com visualização em tempo real via Grafana. A validação experimental abordou três eixos principais: eficiência energética, qualidade de comunicação e exatidão pluviométrica. A análise de consumo comprovou a eficácia das estratégias de baixo consumo, garantindo autonomia estendida. Os testes de comunicação validaram a robustez do enlace LoRa em diferentes Fatores de Espalhamento (SF), mantendo a entrega de pacotes mesmo em cenários de obstrução. Na validação pluviométrica, realizada através de simulação dinâmica de chuva em bancada, o protótipo demonstrou alta exatidão em intensidades leves e moderadas, identificando-se uma divergência não-linear característica em eventos extremos (> 40 mm/h), causada pela energia cinética do fluido. Os resultados confirmam a viabilidade técnica e econômica do sistema como ferramenta de suporte à agricultura e gestão hídrica. Como trabalhos futuros, propõe-se a implementação de algoritmos de compensação dinâmica no *firmware* para correção dos erros em chuvas torrenciais e a portabilidade para arquiteturas modernas como RISC-V.

Palavras-chave: Internet das Coisas; LoRaWAN; Monitoramento Climático; Pluviômetro Digital; FIWARE; Grafana.

ABSTRACT

This work presents the development and validation of an Internet of Things ecosystem aimed at climatic and environmental monitoring in the Sertão Central region of Ceará, Brazil. The proposed system consists of a low-cost monitoring device, manufactured via 3D printing and controlled by the RP2040 (ARM Cortex-M0+) microcontroller, operating over a LoRaWAN network architecture for long-range data transmission. The system collects temperature, humidity, and precipitation data, transmitting them to a cloud infrastructure based on the FIWARE platform, with real-time visualization via Grafana. Experimental validation addressed three main axes: energy efficiency, communication quality, and rainfall measurement accuracy. Consumption analysis confirmed the effectiveness of low-power strategies, ensuring extended autonomy. Communication tests validated the robustness of the LoRa link across different Spreading Factors (SF), maintaining packet delivery even in obstructed scenarios. In the pluviometric validation, performed through dynamic benchtop rain simulation, the prototype demonstrated high accuracy in light and moderate intensities, identifying a characteristic non-linear divergence in extreme events (> 40 mm/h), caused by the fluid kinetic energy. The results confirm the technical and economic feasibility of the system as a support tool for agriculture and water management. Future works propose the implementation of dynamic compensation algorithms in the firmware to correct errors in torrential rains and the porting to modern architectures such as RISC-V.

Keywords: Internet of Things; LoRaWAN; Climate Monitoring; Digital Rain Gauge; FIWARE; Grafana.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Mapa do Sertão Central com postos pluviométricos.	20
Figura 2 – Mapa de Quixadá com postos pluviométricos.	20
Figura 3 – Pluviômetro analógico plástico simples.	22
Figura 4 – Pluviômetro analógico inox Ville de Paris.	22
Figura 5 – Pluviômetro com flutuador.	23
Figura 6 – Estrutura interna de um pluviômetro de balança.	24
Figura 7 – Pluviômetro do tipo TBR.	26
Figura 8 – Estação meteorológica instalada na UFC - Campus Quixadá.	27
Figura 9 – Pluviômetro comercial.	27
Figura 10 – Arquitetura da Internet das Coisas.	30
Figura 11 – Arquitetura de uma Rede de Sensores Sem Fio (WSN).	32
Figura 12 – Exemplo comparativo de consumo energético para operação de divisão de 32 bits entre arquiteturas.	34
Figura 13 – (a) Arquitetura de rede LoRaWAN; e (b) Pilha de protocolos LoRaWAN.	37
Figura 14 – Diferentes classes LoRaWAN.	38
Figura 15 – Comparação entre tecnologias LPWAN.	41
Figura 16 – Diagrama da arquitetura do sistema IoT integrando LoRaWAN, FIWARE e Grafana.).	42
Figura 17 – Hardware do sistema.	45
Figura 18 – Dados em plataforma em nuvem.	45
Figura 19 – Protótipo final.	46
Figura 20 – Fluxograma de funcionamento do sistema.	48
Figura 21 – Dados após conectar a rede local da miniestação.	48
Figura 22 – Protótipo final da miniestação.	49
Figura 23 – Fluxograma de funcionamento do sistema do <i>end device</i>	51
Figura 24 – Fluxograma de funcionamento do sistema do <i>gateway</i>	52
Figura 25 – Dados em plataforma em nuvem.	52
Figura 26 – Ilustração do fluxo do processo metodológico	55
Figura 27 – Ilustração do funcionamento geral do projeto	56
Figura 28 – Sensor SHT30 impermeável.	58
Figura 29 – Sensor de efeito Hall.	59

Figura 30 – Módulo DS3231 RTC.	60
Figura 31 – Módulo LoRa SX1276.	60
Figura 32 – Microcontrolador RP2040 Pico-Zero.	61
Figura 33 – Esquemático do sistema embarcado.	62
Figura 34 – PCB do sistema embarcado.	64
Figura 35 – Primeira versão do modelo 3D do pluviômetro.	65
Figura 36 – Mecanismo basculante do pluviômetro.	65
Figura 37 – Mecanismo de calibração mecânica do pluviômetro.	66
Figura 38 – Terminal serial para depuração com DS3231.	69
Figura 39 – Captura de sinais pelo analisador lógico.	69
Figura 40 – Terminal serial para depuração com SHT30.	70
Figura 41 – Análise do sinal com o sensor Hall.	71
Figura 42 – Terminal serial para visualização local.	72
Figura 43 – Captura de tela do dashboard do Network Server.	73
Figura 44 – Visualização de dados no Servidor.	73
Figura 45 – Montagem completa do Sistema Embarcado.	74
Figura 46 – Esquema de ligação utilizado para os testes de consumo energético empregando multímetro em série.	76
Figura 47 – Esquema de ligação utilizado para os testes de consumo energético empregando o sensor INA219.	76
Figura 48 – Pluviômetro analógico utilizado como referência.	77
Figura 49 – Sistema de gotejamento (Equipo e Reservatório).	79
Figura 50 – Montagem experimental sobre o Protótipo.	79
Figura 51 – <i>Gateway</i> LoRaWAN (baseado em Raspberry Pi 3 e módulo RadioEnge) instalado na sala do NTIC.	82
Figura 52 – Exibição dos containers Docker (FIWARE, Grafana, Mosquitto) no servidor de aplicação.	83
Figura 53 – Pontos de teste 1 (50,80 m) e 2 (37,91 m) no campus da UFC Quixadá.	83
Figura 54 – Pontos de teste 3 (291,25 m) e 4 (122,03 m) no entorno do campus.	84
Figura 55 – Critério de instalação: (a) Suporte de madeira e (b) Verificação de nivelamento (0°).	85
Figura 56 – Verificação da transmissão de pacotes via terminal serial.	86

Figura 57 – Notificação de recebimento de pacotes no dashboard do Servidor LoRaWAN.	86
Figura 58 – Visualização dos dados de telemetria em tempo real na plataforma Grafana.	86
Figura 59 – Visão externa da estação portátil montada com destaque para o filtro de detritos.	89
Figura 60 – Visão detalhada dos componentes internos: mecanismo basculante, sensores e cases de proteção.	90
Figura 61 – Instalação do protótipo em campo para validação experimental.	91
Figura 62 – Instalação do protótipo em campo para validação experimental.	91
Figura 63 – Medição de corrente em modo ativo com multímetro digital.	92
Figura 64 – Medição de corrente em modo <i>Deep Sleep</i> com multímetro digital.	93
Figura 65 – Perfil de corrente dinâmico medido com o sensor INA219 (SF7).	94
Figura 66 – Perfil de tensão da bateria medido com o sensor INA219 (SF7).	95
Figura 67 – Perfil de corrente dinâmico medido com o sensor INA219 (SF9).	96
Figura 68 – Perfil de tensão da bateria medido com o sensor INA219 (SF9).	96
Figura 69 – Perfil de corrente dinâmico medido com o sensor INA219 (SF12).	96
Figura 70 – Perfil de tensão da bateria medido com o sensor INA219 (SF12).	97
Figura 71 – Dados históricos - Estação Profissional (23/10/2025 - 28/10/2025).	103
Figura 72 – Dados históricos - Estação Portátil (23/10/2025 - 28/10/2025).	103
Figura 73 – Detalhe dos dados históricos - Estação Profissional (25/10/2025 - 26/10/2025).	104
Figura 74 – Detalhe dos dados históricos - Estação Portátil (25/10/2025 - 26/10/2025).	104

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os sensores DHT22 e SHT30.	58
Tabela 2 – Comparativo de consumo energético por Fator de Espalhamento.	97
Tabela 3 – Métricas de desempenho - Cenário 1 (49,69 m).	101
Tabela 4 – Métricas de desempenho - Cenário 2 (37,91 m).	101
Tabela 5 – Métricas de desempenho - Cenário 4 (122,03 m).	101
Tabela 6 – Métricas de desempenho - Cenário 3 (291,25 m).	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Análise comparativa dos trabalhos relacionados e deste projeto	54
Quadro 2 – Levantamento de Requisitos	57
Quadro 3 – Principais Materiais Utilizados e suas Funções	62
Quadro 4 – Parâmetros de Ajuste do Gotejamento para Simulação (Duração: 30 min) .	80
Quadro 5 – Média dos Resultados Experimentais (n=5 por intensidade)	99

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	16
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	<i>16</i>
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>16</i>
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Meteorologia Agrícola	18
<i>2.1.1</i>	<i>Importância da Previsão do Tempo e Monitoramento Climático</i>	<i>18</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Papel das estações meteorológicas na coleta de dados</i>	<i>19</i>
<i>2.1.3</i>	<i>Estações pluviométricas</i>	<i>21</i>
2.2	Internet das Coisas	29
<i>2.2.1</i>	<i>Wireless Sensor Networks</i>	<i>30</i>
2.3	Microcontroladores e Arquiteturas de Processamento	32
<i>2.3.1</i>	<i>Principais Arquiteturas no Contexto IoT</i>	<i>32</i>
2.4	Tecnologia LoRa	34
<i>2.4.1</i>	<i>LoRa e suas configurações</i>	<i>35</i>
2.5	LoRaWAN	36
2.6	LPWAN (Low-Power Wide Area Network)	38
<i>2.6.1</i>	<i>Características das LPWANs</i>	<i>39</i>
<i>2.6.2</i>	<i>Camada Física das LPWANs</i>	<i>39</i>
<i>2.6.3</i>	<i>Comparação entre Tecnologias LPWAN</i>	<i>40</i>
2.7	Middleware FIWARE	41
2.8	Plataforma Grafana	42
3	TRABALHOS RELACIONADOS	44
3.1	Protótipo de Estação Meteorológica Utilizando Plataforma IoT	44
3.2	Desenvolvimento de uma Miniestação Meteorológica de Baixo Custo Baseada na Plataforma Arduino	47
3.3	Protótipo de Solução IoT para uma Estação Meteorológica Aplicando Tecnologia LoRa no Ambiente Agro	50
3.4	Comparativo entre os trabalhos relacionados	54
4	METODOLOGIA	55

4.1	Revisão da literatura	55
4.2	Levantamento de requisitos	56
4.3	Seleção dos Componentes	57
4.3.1	<i>Sensor SHT30</i>	57
4.3.2	<i>Sensor Hall</i>	58
4.3.3	<i>Módulo RTC</i>	59
4.3.4	<i>SX1276</i>	60
4.3.5	<i>Microcontrolador RP2040</i>	61
4.4	Distribuição de Componentes e Modelagem 3D	61
4.4.1	<i>Desenvolvimento do Hardware</i>	63
4.4.2	<i>Modelagem 3D do Pluviômetro</i>	64
4.5	Testes Unitários	68
4.5.1	<i>Módulo DS3231 e RP2040</i>	68
4.5.2	<i>Sensor SHT30</i>	70
4.5.3	<i>Sensor A3144</i>	71
4.5.4	<i>Módulo SX1276</i>	71
4.6	Integração dos Componentes, Lógica do Sistema e Eficiência Energética	73
4.6.1	<i>Integração dos Componentes</i>	74
4.6.2	<i>Codificação e a Lógica Implementada do Sistema</i>	74
4.6.3	<i>Consumo energético do sistema integrado</i>	75
4.7	Construção e Validação do Protótipo Funcional	76
4.7.1	<i>Cálculo da Área de Coleta</i>	77
4.7.2	<i>Procedimento Experimental de Simulação de Chuva</i>	78
4.8	Planejamento e Execução de Experimentos de Campo	81
4.8.1	<i>Arquitetura de Coleta e Análise de Dados</i>	81
4.8.2	<i>Planejamento e Localização dos Testes</i>	82
4.8.3	<i>Procedimento de Instalação do Protótipo</i>	84
4.8.4	<i>Execução e Validação do Fluxo de Dados</i>	85
4.8.5	<i>Métricas de Avaliação</i>	87
5	RESULTADOS	88
5.1	Desenvolvimento e Montagem da Estrutura Física (Modelo 3D)	88
5.2	Análise do Consumo Energético	91

5.2.1	<i>Perfil de Consumo: SF7 (Linha de Base)</i>	94
5.2.2	<i>Impacto do Fator de Espalhamento (SF9 e SF12)</i>	95
5.2.3	<i>Estimativa de Autonomia</i>	97
5.3	Análise da Simulação Experimental	98
5.3.1	<i>Consolidação dos Dados Experimentais</i>	98
5.3.2	<i>Análise de Desempenho e Linearidade</i>	99
5.3.3	<i>Conclusão da Validação do Experimento</i>	100
5.4	Avaliação de Desempenho do Protótipo	100
5.4.1	<i>Análise das Métricas de Comunicação por Cenário</i>	100
5.5	Coleta e Análise de Dados Climáticos	102
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	105
6.1	Limitações do Trabalho	106
6.2	Trabalhos Futuros	106
6.2.1	<i>Implementação de Algoritmo de Correção Dinâmica</i>	106
6.2.2	<i>Portabilidade para Arquiteturas Modernas</i>	107
6.2.3	<i>Análise de Dados e Padrões Climáticos</i>	107
	REFERÊNCIAS	108

1 INTRODUÇÃO

Sistemas embarcados constituem um ramo da engenharia da computação voltado para o desenvolvimento de soluções com propósito específico, projetadas para executar funcionalidades definidas de forma repetitiva (Barros; Cavalcante, 2010). Esses sistemas vêm ganhando destaque no cotidiano devido ao baixo custo de implementação e à facilidade de aplicação, especialmente em conjunto com o avanço da Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*). A IoT surge como uma extensão da internet atual, permitindo que objetos do dia a dia, equipados com capacidades de processamento e comunicação, se conectem à rede, viabilizando a coleta, o processamento e o compartilhamento de dados de forma automatizada (Santos *et al.*, 2016). Esse avanço tecnológico é fruto da convergência de diversas áreas, como sistemas embarcados, microeletrônica, sensoriamento e comunicação, oferecendo um vasto campo para inovação e aplicações práticas em diferentes setores, especialmente em monitoramento ambiental.

A aplicação de sistemas embarcados no monitoramento de variáveis ambientais é especialmente relevante em um cenário de mudanças climáticas e na busca por práticas sustentáveis (GEOINOVA, 2023). A necessidade de obter dados precisos e em tempo real é fundamental para compreender as dinâmicas ambientais e responder rapidamente a mudanças nas condições climáticas. Redes de sensores sem fio (WSN, do inglês *Wireless Sensor Network*) desempenham um papel crucial nesse contexto, permitindo a coleta e análise de dados em tempo real por meio de técnicas de aprendizado de máquina, o que fornece uma base sólida para a tomada de decisões informadas e a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação de impactos ambientais (Kumaran *et al.*, 2023). Além disso, o monitoramento climático, particularmente no campo da meteorologia, exerce um papel central na gestão de setores críticos, como agricultura, recursos hídricos e prevenção de desastres naturais (AGROTHINGS, 2024). Contudo, métodos tradicionais de monitoramento, como o uso de pluviômetros analógicos, enfrentam desafios significativos em áreas rurais e remotas.

Nessas regiões, o deslocamento frequente de voluntários para a coleta manual de dados não apenas gera altos custos logísticos, mas também torna o processo trabalhoso e suscetível a falhas humanas. Para superar essas limitações, as tecnologias de IoT apresentam soluções promissoras, com destaque para a comunicação LoRa (*Long Range*) integrada ao protocolo LoRaWAN. Essa tecnologia permite a transmissão de dados a longas distâncias com baixo consumo de energia, sendo ideal para WSN. Utilizando *gateways* multicanais, o sistema possibilita a conexão de diversos dispositivos finais, viabilizando um monitoramento contínuo e

em tempo real, essencial para áreas remotas e estrategicamente relevantes.

Alguns trabalhos recentes, como o de Meneses (2023), Moreira (2019) e Germano (2022), têm explorado a temática do monitoramento ambiental, desenvolvendo sistemas que acompanham variáveis cruciais, como temperatura, umidade do ar e umidade do solo. Esses projetos destacam-se por integrarem tecnologias de comunicação sem fio, promovendo aplicações relevantes, especialmente no contexto da agricultura.

A principal motivação para não utilizar os projetos existentes está na ausência do monitoramento de precipitação, uma variável essencial para o acompanhamento climático. Além disso, nos trabalhos de Meneses (2023) e Moreira (2019), por exemplo, a tecnologia Wi-Fi foi utilizada, o que apresenta limitações significativas em cenários onde as redes de sensores estão implantadas em locais remotos e estratégicos. O Wi-Fi, além de consumir mais energia, oferece curto alcance e suporta um número limitado de dispositivos conectados, tornando-o menos adequado para aplicações em larga escala. Ademais, no trabalho de Meneses (2023), foi observado o uso de um sistema embarcado heterogêneo, com mais de um microcontrolador para um único propósito, o que pode aumentar a complexidade e o custo do projeto. Já no trabalho de Germano (2022), embora tenha sido implementada a tecnologia LoRa, a comunicação foi configurada no modelo ponto-a-ponto, sem explorar o potencial do protocolo LoRaWAN em conjunto com *gateways* multicanais.

O presente estudo tem como foco principal desenvolver um protótipo que visa auxiliar a coleta de dados meteorológicos, com ênfase na mensuração da quantidade de chuvas em locais remotos e estratégicos no Sertão Central do Ceará. Além de monitorar a precipitação, o sistema também considera outros parâmetros fundamentais como temperatura e umidade. A proposta consiste em criar um ecossistema completo e automatizado de coleta de dados, utilizando sensores IoT integrados e transmitindo as informações por meio da tecnologia LoRa em conjunto com a infraestrutura LoRaWAN. Essa abordagem permite a implementação de redes de sensores sem fio escaláveis, suportadas por *gateways* multicanais capazes de gerenciar diversos dispositivos finais simultaneamente, garantindo uma comunicação eficiente e em tempo real. Ao reduzir significativamente a necessidade de deslocamento de voluntários para coleta manual de dados em pluviômetros analógicos, assim como outros parâmetros meteorológicos, o sistema proposto não apenas otimiza o processo logístico, mas também aumenta a precisão e confiabilidade dos dados coletados. Justifica-se, portanto, pela necessidade de um sistema automatizado que ofereça uma solução eficiente e escalável para a coleta e transmissão de

dados meteorológicos, contribuindo para o monitoramento climático contínuo e para a tomada de decisões estratégicas em áreas como agricultura, gestão de recursos hídricos e segurança ambiental.

Dessa maneira, este projeto apresenta contribuições significativas para resolver a problemática do deslocamento constante de voluntários, atualmente necessário para verificar manualmente os dados de pluviômetros e comunicá-los aos órgãos responsáveis pela previsão do tempo. Para abordar essa limitação, propõe-se um sistema de coleta automatizada de dados que integra a conectividade de pluviômetros com a tecnologia LoRa, utilizando a infraestrutura LoRaWAN.

Além de beneficiar diretamente a população rural, como agricultores e produtores, o projeto tem potencial para atender qualquer pessoa ou entidade interessada no monitoramento de dados climáticos e ambientais. Órgãos responsáveis pela previsão do tempo, por exemplo, podem adotar essa solução para melhorar o planejamento e a execução de estratégias de monitoramento climático. Ademais, o sistema contribui para os estudos sobre mudanças climáticas em regiões remotas, oferecendo uma ferramenta prática e escalável para o acompanhamento contínuo de variáveis ambientais essenciais.

A avaliação da eficiência do projeto baseia-se, principalmente, na precisão e confiabilidade dos sensores, bem como na eficácia da transmissão e recebimento de dados utilizando a tecnologia LoRa.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema embarcado baseado em tecnologia LoRa para automatizar a coleta e transmissão de dados meteorológicos em longo alcance, com ênfase na mensuração da quantidade de chuvas, temperatura e umidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver o protótipo do sistema embarcado integrado a sensores IoT para medir precipitação, temperatura e umidade.
- Investigar e avaliar a eficiência da comunicação via LoRa e LoRaWAN, desenvolvendo uma infraestrutura que garanta transmissão em tempo real dos dados coletados.

- Desenvolver e validar o software embarcado para processamento automatizado e transmissão eficiente de dados meteorológicos.
- Realizar testes de campo no Sertão Central do Ceará, especificamente em Quixadá, para validar o desempenho do sistema quanto à precisão, confiabilidade e eficácia operacional.
- Adotar e avaliar uma plataforma em nuvem para o armazenamento, análise e visualização gráfica dos dados coletados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente capítulo apresenta os principais conceitos e definições que fundamentam o trabalho proposto, permitindo ao leitor compreender o escopo do estudo, os problemas abordados e a forma como o sistema desenvolvido contribuirá para sua solução.

A Seção 2.1 apresenta conceitos fundamentais sobre meteorologia agrícola, enfatizando os parâmetros climáticos monitorados no sistema proposto. A Seção 2.2 apresenta o conceito de Internet das Coisas. As Seções 2.4, 2.5 e 2.6 abordam os princípios da comunicação sem fio utilizados neste trabalho, com foco nas tecnologias LoRa, LoRaWAN e LPWAN.

2.1 Meteorologia Agrícola

Meteorologia é a ciência que estuda os fenômenos físicos da atmosfera e desenvolve instrumentos para monitoramento climático. Os dados meteorológicos são fundamentais para análises climatológicas e possuem aplicações na agricultura, permitindo o monitoramento de chuvas, temperatura e umidade (Mendonça; Danni-Oliveira, 2017).

A Meteorologia Agrícola, também chamada de Agrometeorologia, é um ramo específico da meteorologia aplicada que analisa a influência das condições meteorológicas e climáticas nas atividades agrícolas (Monteiro, 2009). Esse campo do conhecimento busca compreender como fatores atmosféricos impactam o crescimento das culturas, a produtividade agrícola, a ocorrência de pragas e doenças e até mesmo o uso eficiente de recursos naturais, como água e energia solar. O monitoramento meteorológico é essencial para o planejamento das atividades agrícolas, pois permite prever fenômenos extremos, como secas e tempestades, além de otimizar o uso da água na irrigação e prevenir perdas na produção (Nascimento *et al.*, 2023). Para isso, utilizam-se diversos equipamentos, incluindo estações pluviométricas, que desempenham um papel central na medição da precipitação.

2.1.1 Importância da Previsão do Tempo e Monitoramento Climático

A previsão do tempo e o monitoramento climático são fundamentais para a agricultura e a gestão de riscos ambientais, pois permitem antecipar eventos extremos, como secas, geadas e tempestades, possibilitando a adoção de estratégias preventivas (Nascimento *et al.*, 2023). Esse acompanhamento auxilia no planejamento do plantio, colheita e irrigação, otimizando o uso da água e reduzindo perdas agrícolas.

Além disso, o monitoramento climático é amplamente utilizado na gestão ambiental para avaliar impactos de secas, enchentes e mudanças no ecossistema. A evolução das tecnologias de monitoramento meteorológico possibilitou modelos mais precisos de previsão climática, que integram sensores IoT e Inteligência Artificial para análise de dados em tempo real.

Segundo (Braga *et al.*, 2015), a previsão do tempo e o monitoramento climático são fundamentais para auxiliar os agricultores na tomada de decisões estratégicas. Esses dados permitem identificar os períodos mais adequados para a realização de atividades agrícolas, como semeadura, plantio e colheita, reduzindo os riscos associados a eventos climáticos adversos. Além disso, a utilização de informações técnico-científicas possibilita um manejo mais eficiente das culturas, contribuindo para a mitigação de perdas decorrentes de condições meteorológicas desfavoráveis.

2.1.2 *Papel das estações meteorológicas na coleta de dados*

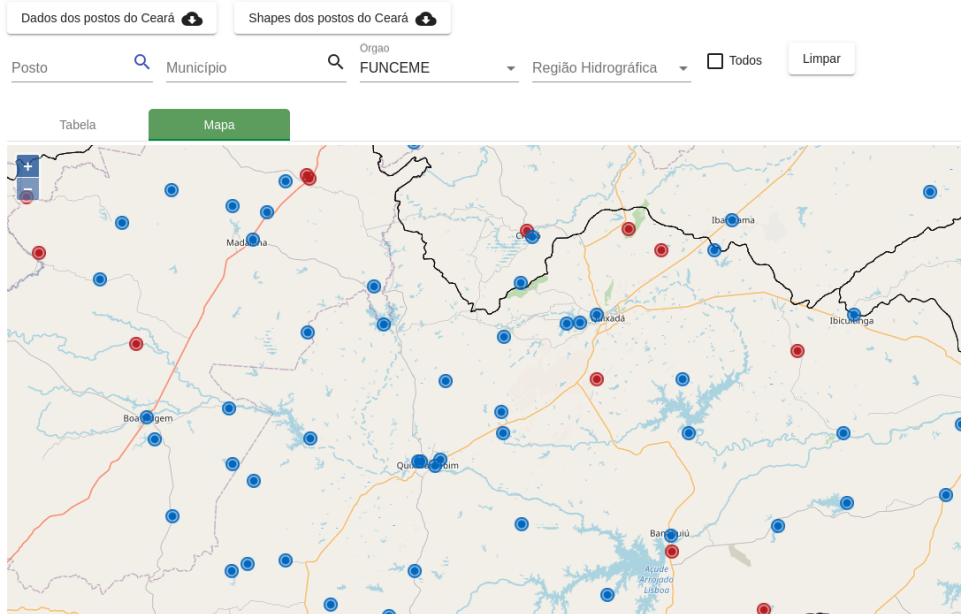
As estações meteorológicas desempenham um papel essencial na coleta de dados atmosféricos, registrando variáveis como temperatura, umidade, velocidade do vento e pressão atmosférica (Sampaio; Dias, 2014). Essas informações são fundamentais para prever o tempo e monitorar padrões climáticos, contribuindo para uma melhor compreensão do comportamento da atmosfera.

Além disso, as observações meteorológicas são complementadas por dados provenientes de outras fontes, como navios, boias oceânicas, aviões e satélites, permitindo uma modelagem mais precisa das condições climáticas. A evolução tecnológica, especialmente a partir da década de 1960, aprimorou a precisão dos sensores meteorológicos, resultando em previsões mais confiáveis (Sampaio; Dias, 2014).

No setor agrícola, a implantação de estações meteorológicas auxilia na tomada de decisões estratégicas, permitindo que agricultores planejem atividades com base em condições climáticas reais. A integração de sensores IoT com estações meteorológicas automáticas possibilita a coleta contínua de dados, viabilizando um monitoramento remoto e em tempo real, o que melhora a eficiência das previsões e a gestão dos recursos hídricos.

A Figura 1 apresenta o mapa com postos pluviométricos na região do Sertão Central, no estado do Ceará.

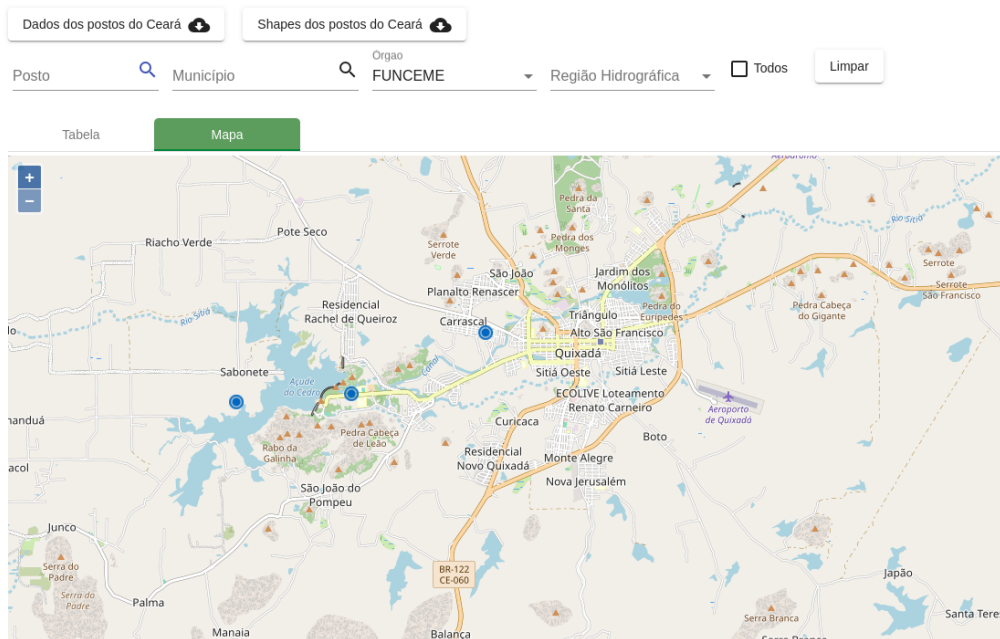
Figura 1 – Mapa do Sertão Central com postos pluviométricos.
Postos Pluviométricos



Fonte: (FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME), 2025).

A Figura 2 apresenta o mapa com postos pluviométricos na cidade de Quixadá, no estado do Ceará.

Figura 2 – Mapa de Quixadá com postos pluviométricos.
Postos Pluviométricos



Fonte: (FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME), 2025).

2.1.3 Estações pluviométricas

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais relevantes para a definição das condições climáticas, especialmente em áreas tropicais e subtropicais (Luiz-Silva *et al.*, 2021). No Brasil, devido à sua grande extensão territorial e diversidade climática, a distribuição da precipitação apresenta fortes contrastes espaciais e sazonais, sendo um fator determinante para a caracterização dos padrões climáticos regionais (Perazzi *et al.*, 2021).

Estações pluviométricas são estruturas projetadas para medir a precipitação atmosférica (chuvas) em uma determinada região. Elas desempenham um papel essencial em setores como a agricultura, a hidrologia e a climatologia, fornecendo dados que auxiliam na previsão do tempo, no manejo da irrigação e na prevenção de desastres naturais.

Além disso, a precipitação é um elemento fundamental no ciclo hidrológico da Terra, estando dinamicamente ligada à circulação atmosférica global. Sua redistribuição influencia diretamente o transporte de calor latente na troposfera, conectando os ciclos globais de água e energia (Blainski *et al.*, 2012). Dessa forma, o monitoramento preciso da precipitação é crucial para a análise climática, auxiliando na compreensão das mudanças nos padrões de precipitação e seus impactos em diferentes ecossistemas.

As estações pluviométricas podem ser classificadas em manuais (convencionais) e automatizadas, de acordo com o método de coleta e transmissão dos dados.

Estações Pluviométricas Manuais

As estações pluviométricas manuais, também conhecidas como pluviômetros analógicos, são amplamente utilizadas para a medição de precipitação devido à sua simplicidade e confiabilidade. Esses instrumentos requerem um observador humano para realizar a leitura e o registro da precipitação, geralmente uma vez ao dia. O funcionamento baseia-se no acúmulo da água da chuva em um recipiente graduado que posteriormente é esvaziado para a quantificação do volume precipitado.

Os pluviômetros analógicos apresentam variações estruturais, podendo ser confeccionados em plástico resistente ou aço inoxidável, a depender da durabilidade e do tipo de aplicação. Modelos mais simples, feitos de plástico, são amplamente utilizados por pequenos agricultores e pesquisadores independentes, enquanto versões mais robustas, como o Pluviômetro Ville de Paris, são recomendadas para medições mais precisas em redes de monitoramento meteorológico.

As Figuras 3, 4 e 5 ilustram diferentes modelos de pluviômetros manuais.

A Figura 3 apresenta um pluviômetro analógico simples, geralmente utilizado para medições ocasionais em pequenas propriedades e estudos acadêmicos.

Figura 3 – Pluviômetro analógico plástico simples.



Fonte: (INFODATAS, 2025).

A Figura 4 ilustra o Pluviômetro Ville de Paris, modelo de referência na Organização Meteorológica Mundial (OMM), amplamente utilizado para medições padronizadas devido à sua capacidade de medir até 125 mm de precipitação acumulada.

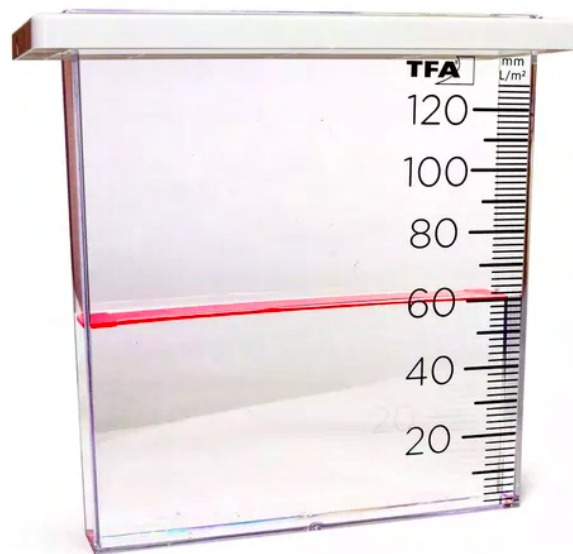
Figura 4 – Pluviômetro analógico inox Ville de Paris.



Fonte: (METALÚRGICA CHICORA, 2025).

Além dos modelos convencionais, existe o pluviômetro flutuador, amplamente utilizado em estações pluviométricas convencionais. Este modelo mede a precipitação com base na variação do nível de água dentro de um recipiente apropriado. Um flutuador interno é conectado a um mecanismo mecânico de registro, que converte a elevação da água em uma medição precisa da precipitação acumulada (Blainski *et al.*, 2012). A Figura 5 ilustra esse tipo de equipamento.

Figura 5 – Pluviômetro com flutuador.



Fonte: (MERCADO LIVRE, 2025).

Os pluviômetros manuais apresentam vantagens e desvantagens que devem ser consideradas ao selecionar um sistema de monitoramento de precipitação (Blainski *et al.*, 2012).

– **Vantagens:**

- Séries históricas mais longas e confiáveis, sendo amplamente utilizadas como referência para estudos climáticos e hidrológicos.
- Baixo custo e facilidade de uso, tornando-os acessíveis para pequenas propriedades e estudos acadêmicos.
- Manutenção simples, não requerendo calibração complexa.

– **Desvantagens:**

- Dependência da presença humana, aumentando o risco de erros de leitura e transcrição.
- Baixa frequência de coleta de dados, podendo resultar em lacunas temporais nas séries históricas.

- Influência de fatores ambientais, como evaporação e respingos internos, que podem comprometer a precisão da medição.

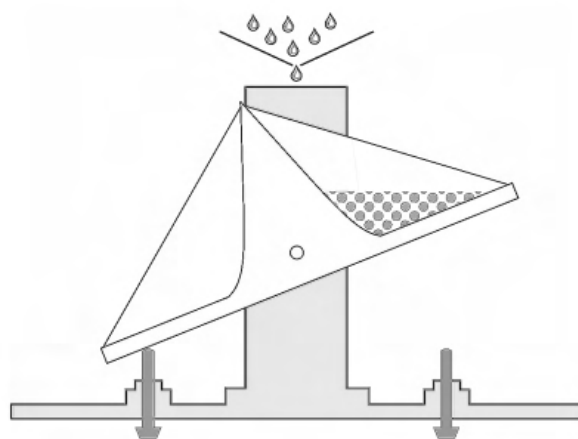
Estações Pluviométricas Automatizadas

As estações pluviométricas automatizadas representam a evolução tecnológica no monitoramento hidrometeorológico, permitindo o registro contínuo da precipitação e a transmissão remota de dados em tempo real, eliminando a necessidade de leitura manual constante (Blainski *et al.*, 2012).

O mecanismo predominante nessas estações é o pluviômetro de balança (*Tipping Bucket*). O princípio de funcionamento deste equipamento segue a estrutura clássica descrita por Erbakanov *et al.* (2018): um recipiente constituído por dois compartimentos simétricos (baldes) é montado sobre um eixo de apoio central (fulcro), posicionado sob um funil coletor.

A operação ocorre por desequilíbrio de massa. Quando a água preenche um dos compartimentos até um nível calibrado, o conjunto torna-se instável e bascula, despejando o volume acumulado e posicionando o compartimento oposto para coleta. Simultaneamente, um ímã fixado ao braço aciona um sensor magnético (*reed switch* ou sensor Hall), gerando um pulso digital contabilizado pelo sistema (Erbakanov *et al.*, 2018). A Figura 6 ilustra a estrutura interna deste mecanismo.

Figura 6 – Estrutura interna de um pluviômetro de balança.



Fonte: Adaptado de (Erbakanov *et al.*, 2018).

Limitações Físicas e Desafios de Medição

Apesar da eficiência na automação, este princípio mecânico impõe limitações físicas à precisão da medida, especialmente sob regimes de precipitação intensa. Segundo (Braga *et al.*, 2008), a performance desses equipamentos não é linear. Em estudos experimentais, os autores demonstraram que a maioria dos pluviômetros tende a apresentar erros sistemáticos quando submetidos a taxas de precipitação elevadas (acima de 100 mm/h).

A causa principal reside na dinâmica do fluxo: durante o tempo mecânico de basculamento, a água continua entrando pelo funil. Dependendo da velocidade do fluxo, esse volume excedente pode ser perdido, resultando em sub-medição, ou alterar a inércia do próximo movimento. Para mitigar esses erros, a literatura aponta para a evolução tecnológica através da eletrônica embarcada. (Braga *et al.*, 2008) constataram que pluviômetros equipados com microprocessadores aptos a mensurar o intervalo entre acionamentos e aplicar correções digitais apresentaram desempenho superior, reduzindo erros de 17% para menos de 2%.

Confiabilidade e Aplicabilidade

A validação dessa tecnologia é amplamente discutida na literatura. (Milanesi *et al.*, 2017) concluíram que, em condições normais, os sensores digitais apresentam alta correlação com instrumentos analógicos de referência. Contudo, (Silva *et al.*, 2011) alertam que, apesar da precisão do sistema digital, a calibração regular é essencial para manter a confiabilidade das séries históricas e minimizar erros instrumentais acumulados.

As principais características das estações automatizadas podem ser resumidas da seguinte forma:

– **Vantagens:**

- Coleta contínua e transmissão em tempo real, oferecendo maior resolução temporal para análises.
- Capacidade de implementação de algoritmos de correção via firmware (compensação eletrônica).
- Eliminação de erros humanos de leitura e transcrição.

– **Desvantagens:**

- Custo de aquisição e infraestrutura superior aos modelos manuais.
- Necessidade de plano de manutenção preventiva (limpeza e calibração) para evitar

falhas eletromecânicas.

As informações registradas por essas estações são fundamentais para o planejamento agrícola e a gestão de recursos hídricos. As Figuras 7, 8 e 9 exemplificam diferentes implementações dessa tecnologia no contexto de monitoramento climático.

A Figura 7 ilustra um pluviômetro automático do tipo TBR, um dos mais utilizados para capturar dados sobre a precipitação.

Figura 7 – Pluviômetro do tipo TBR.



Fonte: (Silva *et al.*, 2011).

A Figura 8 mostra o equipamento instalado na UFC campus Quixadá, contendo, além do pluviômetro, outros sensores para monitoramento climático, como temperatura, umidade, radiação solar, velocidade e direção do vento.

Figura 8 – Estação meteorológica instalada na UFC - Campus Quixadá.



Fonte: Autor

A Figura 9 ilustra um pluviômetro digital comercial, disponível no mercado para aquisição.

Figura 9 – Pluviômetro comercial.



Fonte: (CLIMA E AMBIENTE, 2025).

Parâmetros Medidos nas Estações

Os parâmetros meteorológicos monitorados por estações pluviométricas e meteorológicas são fundamentais para a avaliação das condições climáticas e a previsão de impactos no setor agrícola. Esses dados auxiliam no planejamento agrícola, no manejo da irrigação e na mitigação de eventos climáticos extremos (Braga *et al.*, 2015).

A precipitação é um dos principais parâmetros analisados, sendo fundamental para avaliar a disponibilidade hídrica e prever secas e enchentes. Sua medição é realizada por pluviômetros, que registram a quantidade de chuva acumulada em um período específico, e pluviógrafos, que fornecem registros contínuos, permitindo a análise da intensidade e duração das chuvas.

A temperatura do ar influencia diretamente processos fisiológicos das plantas, como fotossíntese, transpiração e respiração, afetando a produtividade agrícola. Sua variação está associada a fatores como radiação solar, nebulosidade, umidade do ar, vento, topografia e altitude (Strassburger *et al.*, 2011).

Temperaturas extremas podem interferir na absorção de CO_2 , na produção de biomassa e até mesmo no fechamento dos estômatos, comprometendo o crescimento das culturas. O monitoramento da temperatura é realizado por sensores instalados em estações meteorológicas convencionais e automáticas, garantindo medições contínuas e precisas.

A umidade do ar é um fator essencial para a agricultura, pois afeta a taxa de evapotranspiração, a formação de nuvens e a ocorrência de precipitação. O controle desse parâmetro é crucial para evitar estresses hídricos em plantas e prever condições favoráveis ao desenvolvimento de doenças agrícolas (Braga *et al.*, 2015). Além disso, a umidade do solo desempenha um papel determinante na absorção de nutrientes pelas raízes e no crescimento das plantas. Seu monitoramento contínuo permite otimizar o manejo da irrigação, evitando desperdícios de água e aumentando a eficiência do uso dos recursos hídricos.

Além dos fatores citados, outros parâmetros são fundamentais para o monitoramento climático e a agricultura, incluindo:

- **Radiação solar:** Influencia diretamente a fotossíntese e o controle da temperatura do solo, sendo monitorada por piranômetros.
- **Velocidade e direção do vento:** Afetam polinização, dispersão de pragas e evapotranspiração, medidas por anemômetros.
- **Pressão atmosférica:** Importante para a previsão climática e a modelagem de eventos

extremos, registrada por barômetros (Braga *et al.*, 2015).

Os avanços nas tecnologias meteorológicas têm possibilitado medições mais precisas e em tempo real, aprimorando a eficiência do monitoramento climático. No entanto, a substituição de estações convencionais por automáticas exige um processo cuidadoso de homogeneização dos dados, garantindo a confiabilidade das séries históricas (Strassburger *et al.*, 2011).

2.2 Internet das Coisas

A Internet das Coisas (IoT) é uma tecnologia que interconecta dispositivos físicos, sensores e sistemas computacionais, permitindo a comunicação em tempo real entre máquinas, sensores e usuários. Seu principal objetivo é automatizar processos, tornando o mundo físico mais eficiente, inteligente e autônomo por meio da digitalização e da coleta contínua de dados (Wang *et al.*, 2021).

A IoT se baseia em uma arquitetura distribuída, onde diferentes camadas trabalham em conjunto para capturar, transmitir e processar informações. Essa arquitetura pode ser dividida em três principais camadas:

- **Camada de Percepção (*Sensing Layer*)**
 - Inclui sensores, atuadores e dispositivos embarcados responsáveis pela coleta de dados do ambiente (como temperatura, umidade, pressão e movimento).
 - Os dispositivos transformam as informações físicas em dados digitais para posterior processamento.
- **Camada de Rede (*Network Layer*)**
 - Responsável por transmitir os dados coletados para sistemas centrais utilizando diversas tecnologias de comunicação, como Wi-Fi, Bluetooth, redes LPWAN (LoRa, Sigfox, NB-IoT), 5G e redes móveis convencionais.
 - Pode operar tanto em redes privadas quanto na nuvem.
- **Camada de Aplicação (*Application Layer*)**
 - Engloba softwares e plataformas que analisam e interpretam os dados para fornecer insights e automação.
 - É nessa camada que ocorrem as aplicações da IoT em indústrias, saúde, cidades inteligentes e agronegócio.

A Figura 10 ilustra a arquitetura geral da Internet das Coisas (IoT), detalhando as interações entre as camadas.

Figura 10 – Arquitetura da Internet das Coisas.



Fonte: (Filho, 2016).

2.2.1 *Wireless Sensor Networks*

As Redes de Sensores Sem Fio (WSN) são componentes essenciais da Internet das Coisas (IoT), possibilitando a coleta, processamento e transmissão de dados sem a necessidade de conexões físicas. Essas redes são amplamente utilizadas em monitoramento ambiental, automação industrial e infraestruturas inteligentes, como redes elétricas, sistemas de transporte e cidades inteligentes (Yinbiao *et al.*, 2014).

Uma WSN é composta por múltiplos nós sensores distribuídos em um ambiente específico. Cada nó contém sensores embarcados responsáveis por capturar dados sobre variáveis físicas, como temperatura, umidade, pressão, luz e movimento. Esses nós comunicam-se entre si e com um gateway, formando uma rede auto-organizável e distribuída (Yinbiao *et al.*, 2014). Diferentemente de redes convencionais, as WSNs são projetadas para operar com alta eficiência energética, tornando-se ideais para aplicações de monitoramento contínuo e de longo prazo, sem necessidade de manutenção frequente.

Estrutura e Funcionamento das WSNs

A arquitetura básica de uma WSN inclui três principais elementos:

- **Nós Sensores:** Pequenos dispositivos equipados com sensores, um processador e um

módulo de comunicação sem fio. Capturam dados do ambiente e os transmitem para outros nós ou para um gateway.

- **Gateways:** Responsáveis por agregar os dados dos sensores e encaminhá-los para sistemas centrais ou para a nuvem.
- **Infraestrutura de Processamento:** Armazena, analisa e processa os dados recebidos para gerar informações úteis.

O funcionamento das WSNs ocorre em quatro etapas principais:

- **Captura de Dados:** Sensores embarcados detectam variações ambientais e convertem essas informações em sinais elétricos.
- **Processamento Local:** Cada nó sensor pode realizar pré-processamento para reduzir a quantidade de dados transmitidos.
- **Transmissão Sem Fio:** Os dados são transmitidos para outros nós ou diretamente para um gateway, utilizando protocolos como Zigbee, LoRaWAN, Bluetooth ou Wi-Fi.
- **Análise e Decisão:** Após o recebimento dos dados no gateway, eles são enviados para servidores em nuvem ou sistemas locais para análise e tomada de decisão.

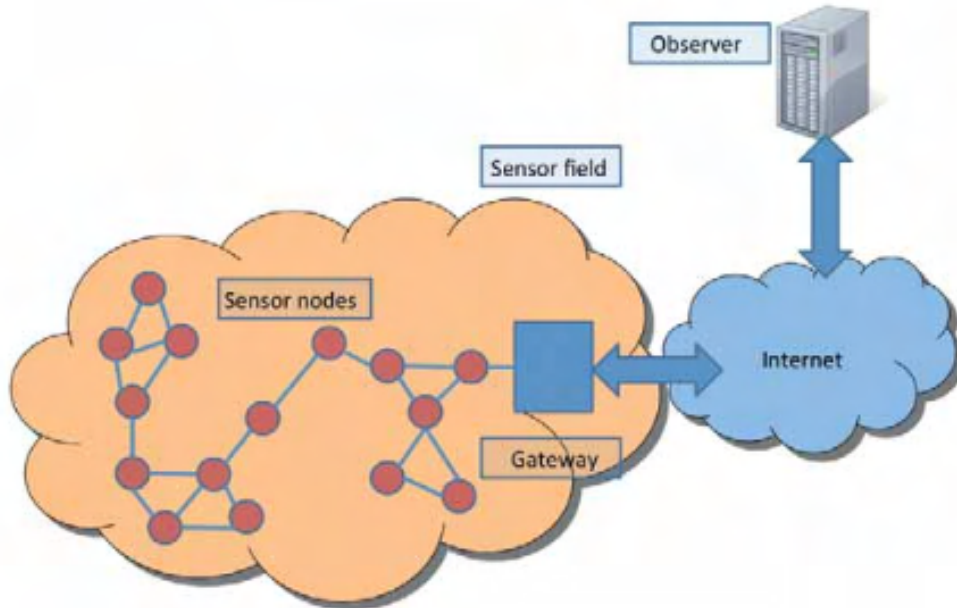
Principais Características das WSNs

As Redes de Sensores Sem Fio apresentam diversas características que as tornam ideais para aplicações IoT:

- **Baixo Consumo de Energia:** Projetadas para operar por longos períodos com baterias limitadas ou fontes alternativas de energia (como energia solar ou térmica).
- **Auto-organização:** Capazes de formar redes dinâmicas sem a necessidade de infraestrutura fixa.
- **Escalabilidade:** Podem ser expandidas adicionando novos nós sem comprometer a rede.
- **Tolerância a Falhas:** A rede pode se reconfigurar automaticamente mesmo se alguns nós falharem.
- **Cobertura Ampla:** Dependendo da tecnologia utilizada, as WSNs podem operar tanto em curtas distâncias (dentro de edifícios) quanto em grandes áreas (agricultura e cidades inteligentes).

A Figura 11 ilustra a arquitetura de uma Rede de Sensores Sem Fio (WSN) e sua interação com os diferentes componentes do ecossistema IoT.

Figura 11 – Arquitetura de uma Rede de Sensores Sem Fio (WSN).



Fonte: (Yinbiao *et al.*, 2014).

2.3 Microcontroladores e Arquiteturas de Processamento

Embora os sistemas embarcados compartilhem o objetivo de realizar tarefas dedicadas, a escolha da arquitetura do processador é determinante para o desempenho e a eficiência energética do dispositivo IoT. A evolução dos microcontroladores permitiu a transição de arquiteturas de 8 bits para 32 bits, impulsionada pela necessidade de maior capacidade de processamento local aliada à eficiência energética em cenários de IoT e Big Data (Ivkovic; Ivkovic, 2017; Al-Kofahi *et al.*, 2019).

2.3.1 Principais Arquiteturas no Contexto IoT

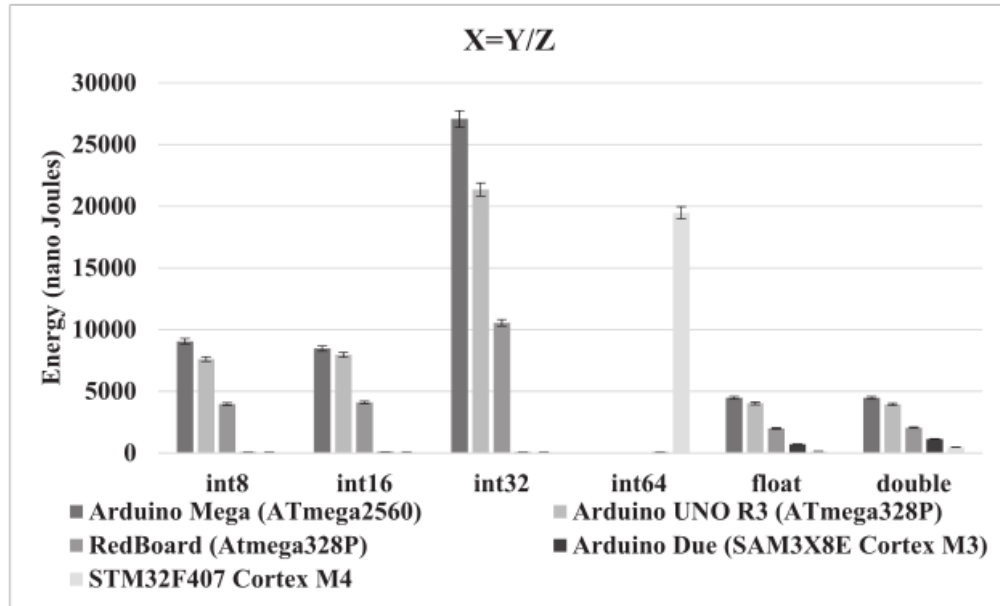
A seleção de um microcontrolador para WSNs deve considerar o compromisso crítico entre poder de processamento e consumo energético (fator $\mu A/MHz$). Atualmente, três arquiteturas se destacam no cenário de desenvolvimento:

- **AVR (8-bit):** Popularizada pela plataforma Arduino (ATmega328P). Embora robusta para aplicações simples, apresenta limitações severas em eficiência energética para processamento de dados. Estudos experimentais demonstram que a execução de operações aritméticas de 32 bits em arquiteturas de 8 bits chega a consumir quatro vezes mais energia do que em arquiteturas nativas de 32 bits, devido à necessidade de múltiplos ciclos de instrução para emular a operação via software (Al-Kofahi *et al.*, 2019).

- **RISC-V:** Uma arquitetura de conjunto de instruções (ISA) aberta e livre de royalties que vem ganhando espaço no desenvolvimento de hardware seguro e customizável (Asanović; Patterson, 2014). Fabricantes como a Espressif iniciaram a migração de parte de sua linha (ex: ESP32-C3) da arquitetura proprietária Xtensa para RISC-V, visando reduzir custos de licenciamento mantendo a eficiência.
- **Xtensa (Espressif):** Utilizada nos populares *Systems on Chip* (SoCs) ESP8266 e na linha ESP32. É uma arquitetura proprietária focada em alto desempenho e conectividade integrada (ESPRESSIF SYSTEMS, 2025). A arquitetura de núcleo duplo (*dual-core*) do ESP32, por exemplo, é projetada para que um núcleo gerencie a pilha de comunicação Wi-Fi e Bluetooth em tempo real, enquanto o outro executa a aplicação do usuário (Ivkovic; Ivkovic, 2017). Essa característica, embora potente, resulta em um consumo de energia superior a microcontroladores ARM Cortex-M focados puramente em baixo consumo, que não possuem o custo energético de manter transceptores de rádio complexos integrados no mesmo silício.
- **ARM Cortex-M (32-bit):** O padrão industrial atual para dispositivos de baixo consumo. A família Cortex-M (M0+, M3, M4) oferece alta densidade de código e a capacidade de executar cálculos complexos rapidamente, permitindo que o dispositivo retorne aos modos de economia de energia (*Sleep*) em menor tempo (Yiu, 2015).

A disparidade de eficiência entre arquiteturas antigas de 8 bits e as modernas de 32 bits é evidenciada na Figura 12. Conforme os dados apresentados por (Al-Kofahi *et al.*, 2019), em operações intensivas como a divisão de variáveis de 32 bits, o custo energético em plataformas AVR é significativamente superior ao observado em núcleos ARM Cortex-M, validando a escolha de uma arquitetura de 32 bits para nós sensores que realizam pré-processamento de dados.

Figura 12 – Exemplo comparativo de consumo energético para operação de divisão de 32 bits entre arquiteturas.



Fonte: Adaptado de (Al-Kofahi *et al.*, 2019).

2.4 Tecnologia LoRa

O LoRa (Long Range) é uma tecnologia de comunicação sem fio desenvolvida pela *Semtech Corporation*, projetada para aplicações de Internet das Coisas (IoT) e sistemas Máquina a Máquina (M2M). Sua operação ocorre em bandas de frequência ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*), possibilitando a comunicação de longo alcance com baixo consumo de energia (Bouguera *et al.*, 2018).

Diferente do LoRaWAN, que atua na camada de rede (*MAC Layer*), o LoRa opera exclusivamente na camada física (*PHY Layer*). Isso significa que ele fornece um meio eficiente para a transmissão de dados sem fio em longas distâncias, sem incluir protocolos para gerenciamento de dispositivos ou segurança de rede. A principal característica do LoRa é sua modulação única baseada em *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Essa técnica permite alcançar longas distâncias com baixo consumo de energia, garantindo uma comunicação confiável mesmo em ambientes sujeitos a interferência e obstáculos físicos (Milarokostas *et al.*, 2022).

Além disso, o uso do CSS reduz a probabilidade de colisão de pacotes e melhora a sensibilidade do receptor, tornando o LoRa uma solução eficiente para cenários com baixa potência disponível. Devido às suas características, o LoRa se consolidou como uma das tecnologias-chave dentro das Redes de Área Ampla de Baixo Consumo (LPWAN - *Low Power Wide Area Network*). Sua versatilidade permite aplicações em diversos setores, incluindo:

- **Indústria 4.0:** Monitoramento remoto de máquinas e equipamentos industriais.
- **Cidades inteligentes:** Controle de iluminação pública, monitoramento de tráfego e qualidade do ar.
- **Monitoramento ambiental:** Sensoriamento remoto de variáveis meteorológicas e ambientais.
- **Gestão de recursos hídricos:** Supervisão de reservatórios, detecção de vazamentos e qualidade da água.
- **Agricultura inteligente:** Monitoramento do solo, irrigação automatizada e rastreamento de condições climáticas.
- **Infraestruturas de energia:** Medição remota de consumo e gerenciamento de redes elétricas.

A capacidade do LoRa de fornecer comunicação de longo alcance com baixo consumo de energia faz com que ele seja amplamente adotado em cenários onde a conectividade tradicional, como Wi-Fi ou redes celulares, seria inviável devido a limitações de cobertura e consumo energético.

2.4.1 *LoRa e suas configurações*

No estudo de (Bouguera *et al.*, 2018) é destacado que o rádio LoRa proporciona diversas possibilidades de configuração, sendo que a maioria delas pode ser personalizada, o que pode influenciar diretamente a comunicação e a velocidade de transmissão de dados. Os principais parâmetros configuráveis são:

- **Carrier Frequency (CF):** Representa a frequência central da banda utilizada para transmissão. No caso do transceptor **SX1272**, por exemplo, a frequência varia entre 863 MHz e 870 MHz na Europa.
- **Spreading Factor (SF):** Define o número de **chips** por símbolo, influenciando diretamente o alcance da comunicação e a taxa de transmissão de dados. O SF pode ser configurado entre **SF7** e **SF12**, seguindo as seguintes características:
 - **SF menor (ex: SF7):** Maior taxa de transmissão, menor alcance e menor consumo de energia.
 - **SF maior (ex: SF12):** Menor taxa de transmissão, maior alcance e maior consumo de energia.

A relação entre SF e a taxa de transmissão pode ser expressa pela equação:

$$R_{\text{bit}} = \frac{SF \times BW}{2^{SF} \times CR} \quad (2.1)$$

- **Bandwidth (BW)**: Representa a largura de banda do canal de transmissão e pode ser configurado em 125 kHz, 250 kHz ou 500 kHz. A escolha da BW afeta o desempenho da comunicação:
 - **Maior BW (ex: 500 kHz)**: Maior taxa de transmissão, menor alcance e maior consumo de energia.
 - **Menor BW (ex: 125 kHz)**: Menor taxa de transmissão, maior alcance e menor consumo de energia.
- **Coding Rate (CR)**: Define a taxa de correção de erros, permitindo maior confiabilidade da transmissão. Expressa como:

$$CR = \frac{4}{4+n}, \quad \text{onde } n = 1, 2, 3, 4. \quad (2.2)$$

- **CR menor (ex: 4/5)**: Menor redundância, maior eficiência espectral e menor tempo de transmissão.
- **CR maior (ex: 4/8)**: Maior redundância, mais resistência contra interferências, porém maior tempo de transmissão.

A escolha adequada desses parâmetros é essencial para otimizar o consumo de energia, o alcance e a taxa de transmissão do sistema. O ajuste entre SF, BW e CR proporciona um equilíbrio entre alcance, taxa de dados e eficiência energética, sendo um fator chave para o desempenho de redes baseadas em LoRa (Bouguera *et al.*, 2018).

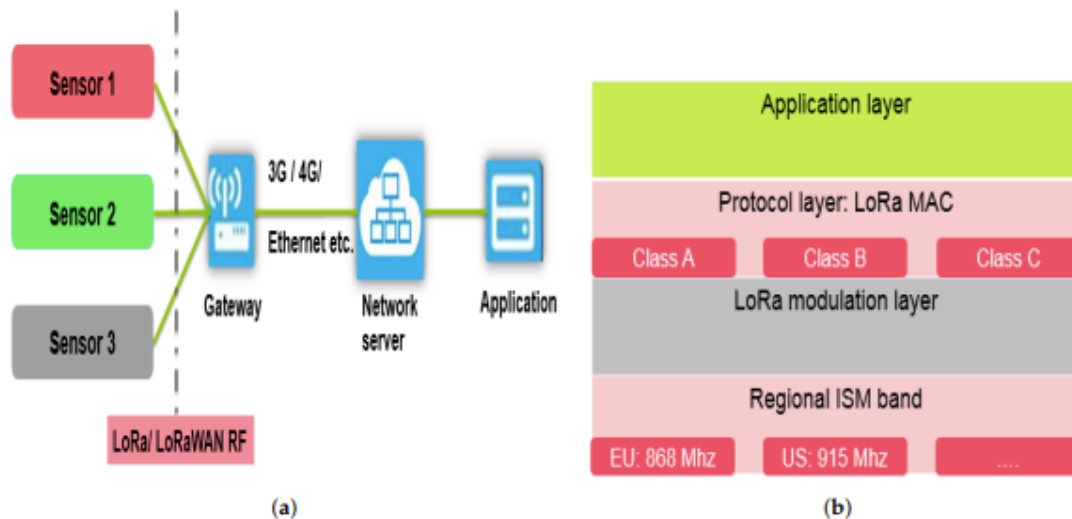
2.5 LoRaWAN

O LoRaWAN é um protocolo de comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, projetado para conectar dispositivos IoT em grandes áreas. Ele permite comunicação bidirecional eficiente entre dispositivos remotos e servidores de rede, tornando-se uma solução ideal para aplicações que exigem baixo consumo de energia e longo alcance (Silva *et al.*, 2017).

Ademais, o LoRaWAN opera na camada de enlace de dados (*Data Link Layer*), facilitando a comunicação direta entre dispositivos finais (*end-devices*) e *gateways* através de um único salto. Essa abordagem simplifica a infraestrutura da rede e reduz a complexidade operacional, além de incorporar mecanismos nativos de criptografia, garantindo segurança nas comunicações e possibilitando a implementação de redes públicas e privadas.

A Figura 13 ilustra a arquitetura de rede LoRaWAN.

Figura 13 – (a) Arquitetura de rede LoRaWAN; e (b) Pilha de protocolos LoRaWAN.



Fonte: (Bouguera *et al.*, 2018).

Na estrutura LoRaWAN, os componentes principais são:

- **Dispositivos Finais (*End-Devices*):** Sensores ou atuadores equipados com módulos LoRaWAN, responsáveis pela coleta de dados e envio de informações.
- **Gateways:** Responsáveis por receber os pacotes enviados pelos dispositivos finais e encaminhá-los ao servidor de rede através de outras tecnologias de comunicação, como Ethernet, 3G/4G ou Wi-Fi.
- **Servidor de Rede:** Garante a autenticação dos dispositivos, gerencia os pacotes transmitidos e encaminha os dados para as plataformas de aplicação.

O protocolo LoRaWAN define três classes de dispositivos finais, cada uma com características específicas para equilibrar latência e consumo de energia, dependendo das necessidades das aplicações.

- **Classe A (Bidirecional):**
 - Classe mais comum e eficiente em termos de consumo de energia.
 - Dispositivos possuem janelas de transmissão (*uplink*) programadas e seguem com duas janelas de recepção (*downlink*) após cada envio.
 - Apresenta menor consumo energético, porém com latência maior para recepção de mensagens.
- **Classe B:**
 - Possui janelas adicionais programadas para *downlink*, permitindo menor latência na

comunicação em comparação com a Classe A.

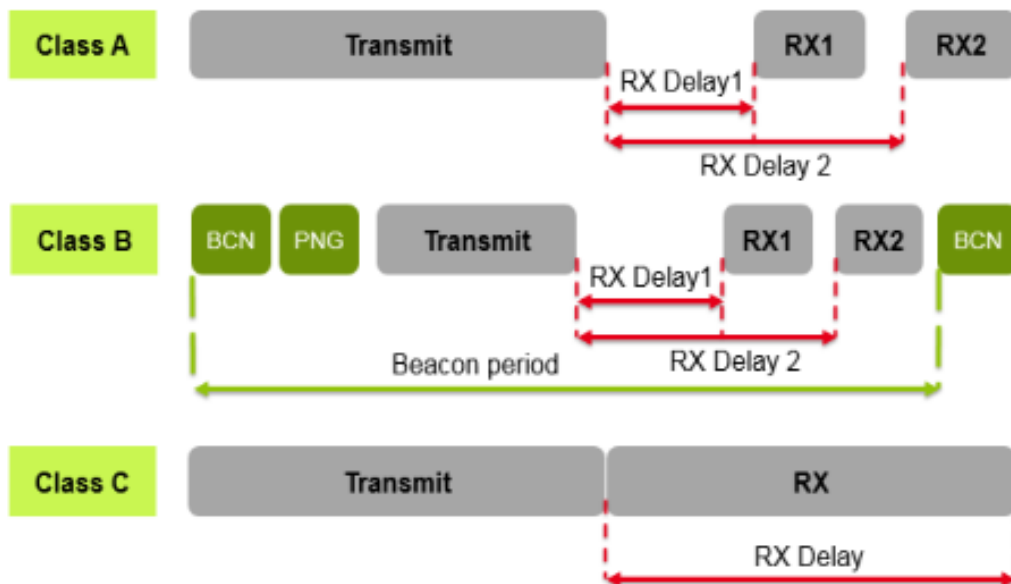
- Apresenta consumo de energia moderado, ideal para aplicações que requerem mais previsibilidade na comunicação.

– **Classe C:**

- Janelas de recepção abertas continuamente, proporcionando a menor latência possível para mensagens de unicast e multicast.
- Consome mais energia, pois os dispositivos estão constantemente "ouvindo" mensagens, sendo mais adequado para aplicações que exigem comunicação contínua (Silva *et al.*, 2017; Bouguera *et al.*, 2018).

A Figura 14 ilustra as diferentes classes de dispositivos LoRaWAN.

Figura 14 – Diferentes classes LoRaWAN.



Fonte: (Bouguera *et al.*, 2018).

2.6 LPWAN (*Low-Power Wide Area Network*)

As LPWANs são redes sem fio projetadas para conectar dispositivos IoT (*Internet das Coisas*) que exigem baixo consumo de energia e comunicação de longo alcance. Essas redes são particularmente úteis para aplicações em que dispositivos remotos precisam operar por anos sem recarga de bateria, como sensores industriais, monitoramento ambiental e cidades inteligentes (Milarokostas *et al.*, 2022).

2.6.1 Características das LPWANs

As LPWANs foram projetadas para minimizar o consumo energético, permitindo que dispositivos operem por anos sem substituição de bateria. Isso é possível por meio de:

- **Baixo consumo de energia:** Técnicas de otimização de transmissão, como modulações eficientes e envio intermitente de dados, permitem que LPWANs operem por até 10 anos com uma única bateria (Khutsoane *et al.*, 2017).
- **Comunicação de longo alcance:** Dependendo do ambiente e da tecnologia utilizada, a cobertura pode variar de 2 a 50 km, tornando-as ideais para áreas rurais e locais de difícil acesso (Silva *et al.*, 2017).
- **Baixa taxa de transmissão de dados:** As LPWANs oferecem velocidades reduzidas, geralmente entre 0,3 kbps e 50 kbps, sendo ideais para sensores IoT que transmitem pequenas quantidades de dados periodicamente (Silva *et al.*, 2017).
- **Operação em bandas não licenciadas e licenciadas:** Algumas tecnologias LPWAN utilizam espectros não licenciados, como LoRaWAN e Sigfox, enquanto outras, como NB-IoT e LTE-M, operam em espectros celulares licenciados (Silva *et al.*, 2017).

A maioria das LPWANs adota uma topologia em estrela, na qual dispositivos IoT se conectam a gateways, que encaminham os dados para a infraestrutura em nuvem. Isso simplifica a arquitetura da rede e reduz a complexidade do roteamento.

2.6.2 Camada Física das LPWANs

A camada física define como os dados são modulados e transmitidos no meio físico. Diferentes tecnologias LPWAN utilizam modulações distintas para otimizar eficiência, alcance e consumo energético.

Modulação LoRa (LoRaWAN)

A tecnologia LoRaWAN é uma das mais utilizadas em LPWANs e emprega a modulação *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Segundo (Silva *et al.*, 2017), Esta modulação proporciona transmissões resistentes contra interrupções, garantindo um alcance maior em comparação ao *Frequency Shift Keying* (FSK), empregado em algumas LPWANs mais antigas.

Características principais:

- Alcance de 2 a 20 km.

- Modulação LoRa (CSS).
- Taxa de dados de 300 bps a 50 kbps.
- Operação em bandas ISM (não licenciadas).

Modulação BPSK (SigFox)

A tecnologia Sigfox emprega a modulação *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) em *Ultra Narrow Band* (UNB), permitindo baixo consumo de energia e alcance de até 50 km. No entanto, possui limitações na quantidade de mensagens que podem ser transmitidas por dia (Silva *et al.*, 2017). Características principais:

- Alcance de até 50 km.
- Baixíssima taxa de dados (100 bps).
- Limitação de 140 mensagens de 12 bytes por dia.
- Modelo de rede totalmente gerenciado pela Sigfox.

NB-IoT e LTE-M

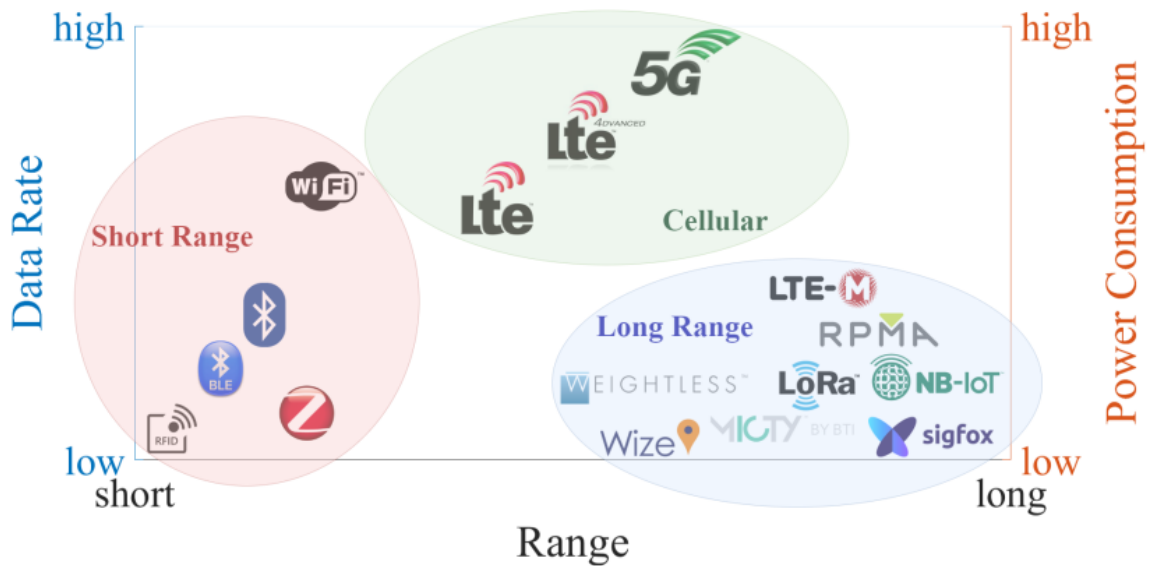
As tecnologias *Narrowband IoT* (NB-IoT) e *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) operam em bandas licenciadas de redes móveis (4G e 5G) e utilizam modulações OFDM e DSSS. Embora consumam mais energia que LoRaWAN e Sigfox, essas tecnologias oferecem maior confiabilidade e segurança, sendo recomendadas para aplicações industriais e cidades inteligentes (Khutsoane *et al.*, 2017).

- Operação em bandas licenciadas (4G e 5G).
- Suporte para mobilidade e *handover*.
- Baixa latência e maior confiabilidade.
- Ideal para aplicações críticas e monitoramento industrial.

2.6.3 Comparação entre Tecnologias LPWAN

A Figura 15 ilustra a comparação entre diferentes tecnologias LPWAN, destacando taxa de dados, alcance e consumo de energia.

Figura 15 – Comparação entre tecnologias LPWAN.



Fonte: (Milarokostas *et al.*, 2022).

2.7 Middleware FIWARE

O FIWARE atua como um *middleware* de código aberto e baseado em padrões, projetado para padronizar a gestão de dados em soluções IoT, desde cidades inteligentes até a agricultura de precisão (Cirillo *et al.*, 2020). O núcleo da sua arquitetura é o *Orion Context Broker* (OCB), responsável pelo gerenciamento de contexto em tempo real através da interface padrão NGSI (*Next Generation Service Interface*). Este modelo assegura a interoperabilidade e facilita a troca de informações entre sistemas heterogêneos (Cirillo *et al.*, 2020; Hernández *et al.*, 2021).

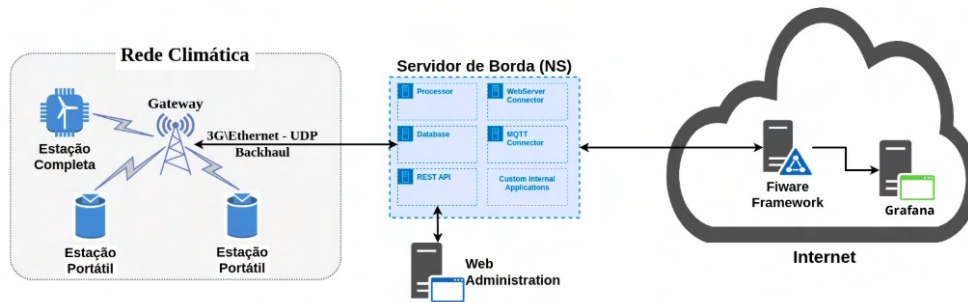
A conexão com dispositivos físicos é abstraída pelos *IoT Agents*, que traduzem protocolos de comunicação (como LoRaWAN e MQTT) para o padrão NGSI compreendido pelo Orion (Amurim *et al.*, 2021). Conforme demonstrado por (Hernández *et al.*, 2021), essa arquitetura permite integrar dados provenientes de servidores de rede LoRaWAN, diretamente ao fluxo de contexto da aplicação.

Para viabilizar a análise histórica e a visualização gráfica (como no Grafana), o FIWARE utiliza *Generic Enablers* de persistência, como o QuantumLeap e o Cygnus. Estes componentes transferem os dados do Orion para bancos de dados de séries temporais (ex: CrateDB, MongoDB), enquanto o componente STH-Comet (*Short Time Historic*) gerencia o histórico de curto prazo (Amurim *et al.*, 2021; Hernández *et al.*, 2021). Essa estrutura modular garante a escalabilidade da solução, permitindo o fluxo eficiente da informação desde a borda

até a nuvem.

A Figura 16 ilustra esse fluxo de dados completo, desde a captura na rede climática até a visualização final pelo usuário.

Figura 16 – Diagrama da arquitetura do sistema IoT integrando LoRaWAN, FIWARE e Grafana.).



Fonte: Autor.

2.8 Plataforma Grafana

No contexto de sistemas IoT, a visualização de dados desempenha um papel fundamental na transformação de leituras brutas de sensores em informações acionáveis. Para atender ao objetivo específico de adotar uma plataforma para armazenamento, análise e visualização gráfica, o Grafana apresenta-se como uma ferramenta robusta de código aberto, amplamente utilizada para monitoramento e observabilidade.

O Grafana é definido como um compositor de painéis (*dashboards*) e gráficos de propósito geral, especializado na visualização de dados em séries temporais para infraestruturas de internet e análises de aplicações (Nor *et al.*, 2017). Sua arquitetura permite a integração com diversas fontes de dados, sendo frequentemente utilizado em conjunto com bancos de dados de séries temporais, para garantir a persistência e o histórico das coletas (Fajar; Samijayani, 2021; Nor *et al.*, 2017).

Em aplicações baseadas no protocolo LoRaWAN, o Grafana atua na camada de aplicação, servindo como a interface final para o usuário. No trabalho de (Fajar; Samijayani, 2021), foi demonstrado essa aplicabilidade em um sistema de monitoramento de estufas agrícolas, onde o Grafana foi empregado para visualizar, em tempo real, parâmetros ambientais como temperatura, umidade e intensidade luminosa. Neste cenário, a plataforma permitiu a criação

de gráficos dinâmicos e medidores (*gauges*) que facilitam o acompanhamento das condições microclimáticas, permitindo ajustes de intervalos de tempo (por exemplo, visualização dos últimos 30 minutos ou 1 hora) conforme a necessidade da análise (Fajar; Samijayani, 2021).

Além da visualização de dados de sensores, o Grafana é eficaz na análise de desempenho da própria rede de comunicação. Segundo (Nor *et al.*, 2017), ao desenvolverem um sistema de monitoramento de tráfego inteligente, utilizaram a ferramenta para exibir não apenas o status de congestionamento das vias, mas também métricas críticas de qualidade de sinal, como o RSSI (*Received Signal Strength Indicator*) e o SNR (*Signal-to-Noise Ratio*).

A implementação típica do Grafana em arquiteturas LoRaWAN envolve o fluxo de dados desde os nós sensores, passando pelos *Gateways* e Servidores de Rede, até serem processados e armazenados. Ambos os trabalhos analisados convergem na utilização do banco de dados como camada de armazenamento intermediária, onde os dados, após serem decodificados (por exemplo, via Node-RED ou serviços Node JS), são persistidos antes de serem consultados e renderizados pelo Grafana (Fajar; Samijayani, 2021; Nor *et al.*, 2017).

Assim sendo, a adoção do Grafana satisfaz os requisitos de análise e visualização gráfica, oferecendo uma interface web customizável que suporta a tomada de decisão baseada tanto nos dados coletados em campo quanto na saúde da infraestrutura de comunicação.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção, são apresentados estudos relacionados ao projeto proposto, destacando pontos em comum e diferenças em relação à presente pesquisa. Para fins comparativos, foram analisados aspectos como os parâmetros ambientais monitorados, o microcontrolador utilizado, e o protocolo de comunicação utilizado para a transferência dos dados. Ao final da seção, é apresentada uma tabela que resume as características mais relevantes de cada protótipo analisado, incluindo o proposto neste trabalho.

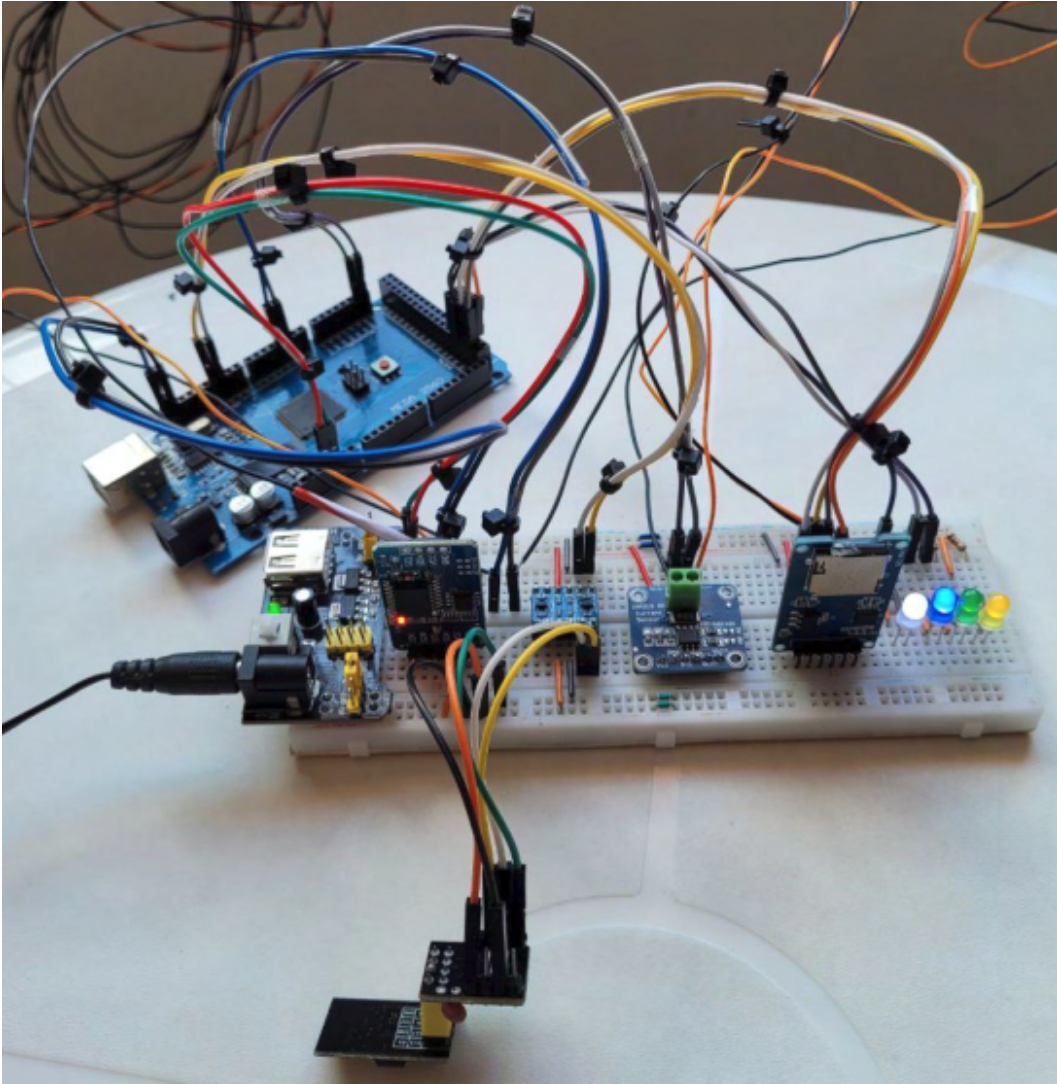
3.1 Protótipo de Estação Meteorológica Utilizando Plataforma IoT

O estudo de (Meneses, 2023) apresenta a proposta de uma estação meteorológica baseada em IoT. O sistema utiliza sensores integrados, como os de temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e radiação solar, além de um módulo de comunicação Wi-Fi que permite o envio dos dados coletados para a nuvem. Essa funcionalidade possibilita que os usuários monitorem as informações em tempo real por meio de um painel de controle (*dashboard*).

O protótipo visa criar uma estação meteorológica inteligente que, ao coletar dados meteorológicos, fornece informações que podem ser utilizadas para tomadas de decisão em tempo real. Isso torna-se relevante em projetos relacionados à geração de energia renovável, como solar e eólica, onde o conhecimento preciso das condições climáticas é essencial para garantir eficiência e um planejamento adequado.

As Figuras 17, 18 e 19 ilustram diferentes aspectos da estação meteorológica baseada em IoT e comunicação com o sistema de nuvem. A Figura 17 apresenta o hardware utilizado no sistema. A Figura 18 exibe a interface de visualização dos dados armazenados na nuvem. Por fim, a Figura 19 mostra o protótipo final desenvolvido para a estação meteorológica.

Figura 17 – Hardware do sistema.



Fonte: (Meneses, 2023)

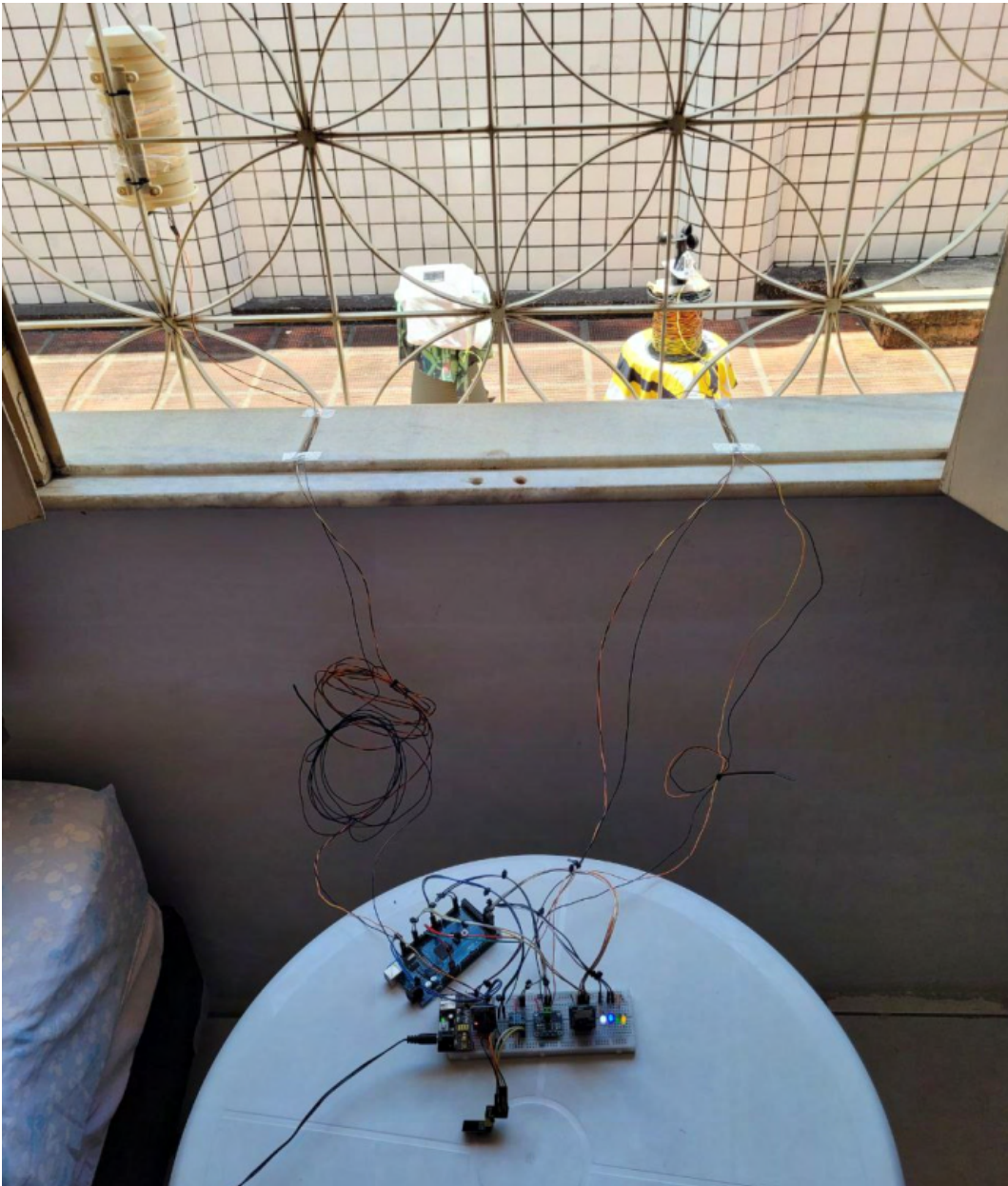
Figura 18 – Dados em plataforma em nuvem.

New Feed New Group

Default			
Feed Name	Key	Last value	Recorded
<input type="checkbox"/> Calibração Piranômetro - corrente	calibracao-piranometro-c...	0.000000	11 days ago
<input type="checkbox"/> Radiação Solar - Atual	radiacao-solar-actual	583.400024	about 4 hours ago
<input type="checkbox"/> Radiação Solar - Média	radiacao-solar-media	274.019989	about 4 hours ago
<input type="checkbox"/> Radiação Solar - Total	radiacao-solar-total	0	about 19 hours ago
<input type="checkbox"/> Temperatura - Atual	temperatura-actual	33.799999	about 4 hours ago
<input type="checkbox"/> Temperatura - Média	temperatura-media	29.730000	about 4 hours ago
<input type="checkbox"/> Umidade - Atual	umidade-actual	65.000000	about 4 hours ago
<input type="checkbox"/> Umidade - Média	umidade-media	82.959999	about 4 hours ago
<input type="checkbox"/> Velocidade Do Vento - Atual	velocidade-do-vento-actual	0.000000	about 4 hours ago
<input type="checkbox"/> Velocidade Do Vento - Média	velocidade-do-vento-med...	0.160000	about 4 hours ago

Fonte: (Meneses, 2023)

Figura 19 – Protótipo final.



Fonte: (Meneses, 2023)

Em comparação, o presente trabalho avança significativamente ao integrar uma abordagem que utiliza ferramentas para o monitoramento de precipitação local e ao integrar a tecnologia LoRa e LoRaWAN. Enquanto a comunicação no trabalho de (Meneses, 2023) é realizada via Wi-Fi utilizando a placa ESP, o que restringe o alcance à infraestrutura de rede disponível e exige conexão constante à internet, o uso do LoRa no presente estudo permite comunicação em longas distâncias (vários quilômetros), sendo ideal para áreas extensas ou rurais.

Além disso, a arquitetura do LoRaWAN oferece suporte a um grande número de dispositivos (*end-devices*) de forma organizada, com endereçamento e gerenciamento de pacotes,

facilitando a escalabilidade e expansão do sistema. Em contraste, o sistema de (Meneses, 2023) apresenta limitações em termos de escalabilidade, devido à dependência de redes Wi-Fi e à capacidade limitada de dispositivos conectados.

Outro diferencial importante é a eficiência energética. O sistema de (Meneses, 2023) depende de placas como Arduino e ESP, que, embora viáveis, podem não ser tão eficientes em termos de consumo de energia, especialmente em operações contínuas, enquanto o presente trabalho propõe uma solução mais eficiente nesse aspecto.

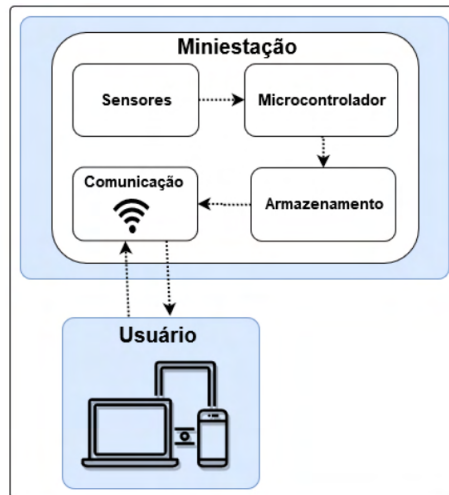
3.2 Desenvolvimento de uma Miniestação Meteorológica de Baixo Custo Baseada na Plataforma Arduino

(Moreira, 2019) apresenta uma proposta de uma miniestação meteorológica de baixo custo baseada na plataforma Arduino, com o objetivo de coletar e monitorar dados ambientais de forma acessível e eficiente. O sistema utiliza sensores para medir temperatura, umidade do ar, umidade do solo e detectar chuva.

O sistema descrito utiliza o microcontrolador ESP32 para realizar o processamento e transmitir os dados da miniestação via Wi-Fi. Embora essa abordagem seja eficaz para aplicações básicas, apresenta limitações significativas, como a dependência de infraestrutura Wi-Fi, o que restringe sua aplicabilidade em áreas sem acesso à internet.

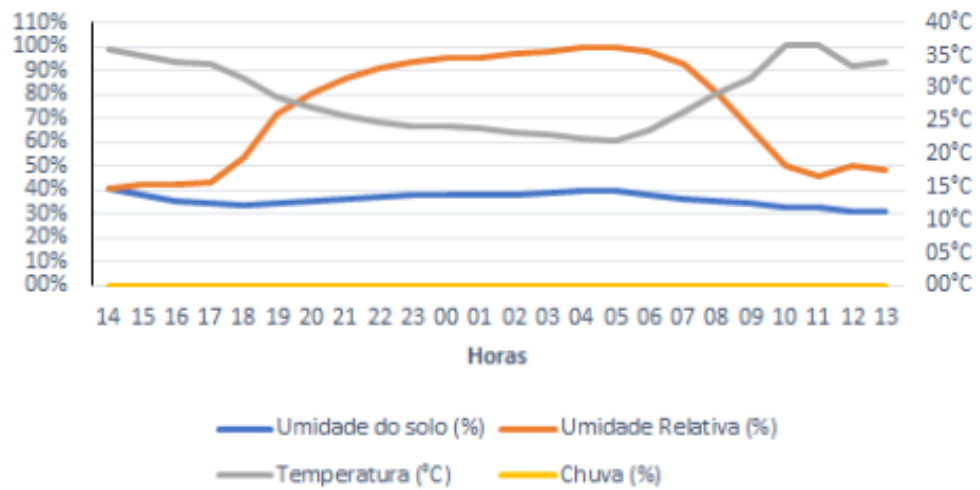
As Figuras 20, 21 e 22 ilustram diferentes aspectos do funcionamento da miniestação meteorológica de baixo custo baseada na plataforma Arduino. A Figura 20 apresenta o fluxo-grama do sistema, detalhando seu funcionamento. A Figura 21 exibe a interface de visualização dos dados após a conexão do usuário à rede local onde o microcontrolador está implantado. Por fim, a Figura 22 mostra o protótipo final desenvolvido para a miniestação meteorológica.

Figura 20 – Fluxograma de funcionamento do sistema.



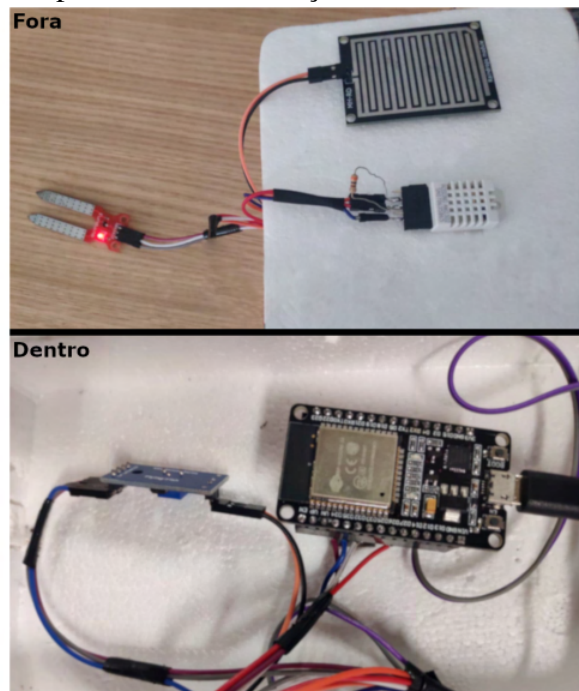
Fonte: (Moreira, 2019)

Figura 21 – Dados após conectar a rede local da miniestação.



Fonte: (Moreira, 2019)

Figura 22 – Protótipo final da miniestação.



Fonte: (Moreira, 2019)

Outro ponto limitante é o alto consumo de energia inerente à tecnologia Wi-Fi, além da baixa escalabilidade devido à capacidade limitada de dispositivos que podem ser conectados à rede. Em contraste, o presente trabalho adota a tecnologia LoRa e LoRaWAN, que permite a transmissão de dados em longas distâncias, mesmo em áreas remotas, sem exigir conexão constante à internet. Ademais, este estudo prioriza o uso de microcontroladores e sensores otimizados para baixo consumo energético, tornando o sistema mais eficiente e adequado para operações em locais com recursos limitados.

Quanto ao monitoramento da precipitação, (Moreira, 2019) utiliza um sensor de detecção de chuva, que indica a presença de água (chuva) com base em mudanças elétricas, mas não fornece medidas exatas da quantidade de precipitação. Apesar de adequado para aplicações simples, o sensor não oferece medições quantitativas, o que limita sua utilização em análises detalhadas de precipitação. Por outro lado, o presente trabalho oferece uma abordagem mais abrangente que é não só monitorar se há ou não presença de chuva, e sim permitir saber exatamente quanto de chuva caiu em um determinado período por meio da implantação de pluviômetros, sendo essenciais para análises mais detalhadas e aplicações como gestão hídrica e agricultura.

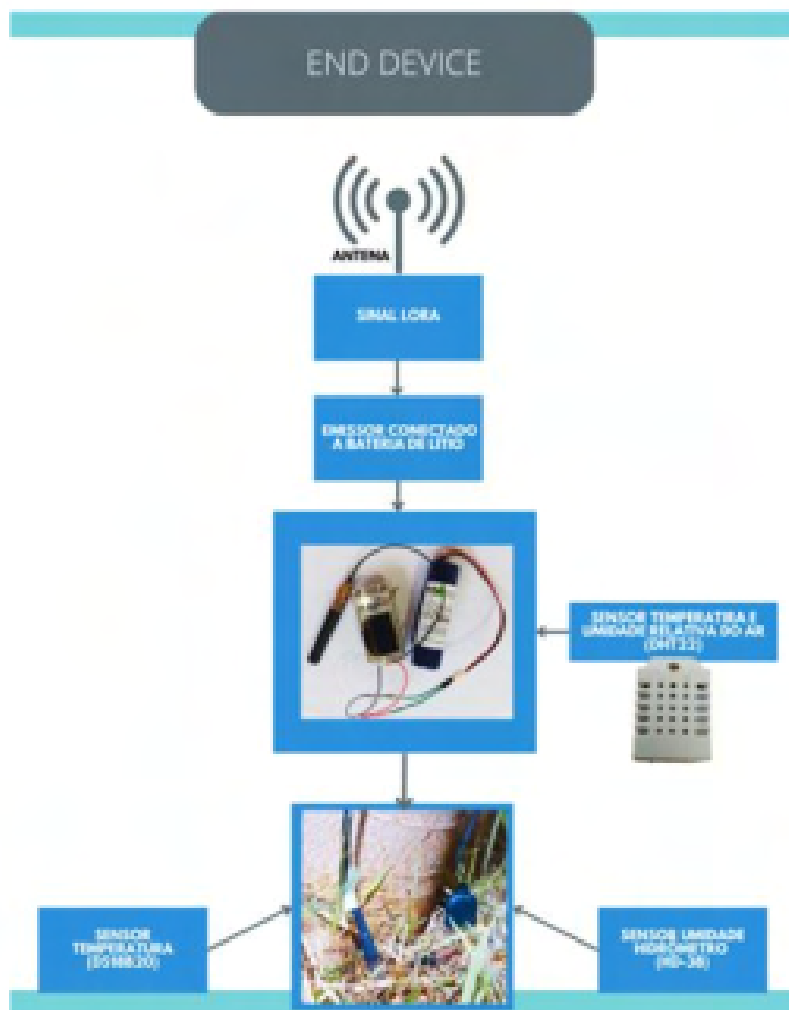
3.3 Protótipo de Solução IoT para uma Estação Meteorológica Aplicando Tecnologia LoRa no Ambiente Agro

(Germano, 2022) explora o desenvolvimento de uma estação meteorológica de baixo custo utilizando tecnologia LoRa, com foco em aplicações no ambiente agro. O sistema utiliza sensores para medir variáveis ambientais, como temperatura e umidade do ar, além de sensores para umidade do solo (com sonda) e temperatura do solo. A seleção dos dispositivos foi baseada nos objetivos do projeto, abrangendo tanto o *gateway* quanto o dispositivo final, ambos integrados com chips LoRa para comunicação.

O dispositivo final no trabalho relacionado é responsável por coletar os dados dos sensores e transmitir essas informações para o *gateway*, por meio da comunicação LoRa. O *gateway*, também baseado em um microcontrolador ESP32, decodifica esses dados e os encaminha para um servidor. Essa abordagem é especialmente adequada para áreas rurais onde a conexão Wi-Fi é limitada, garantindo maior confiabilidade na transmissão dos dados.

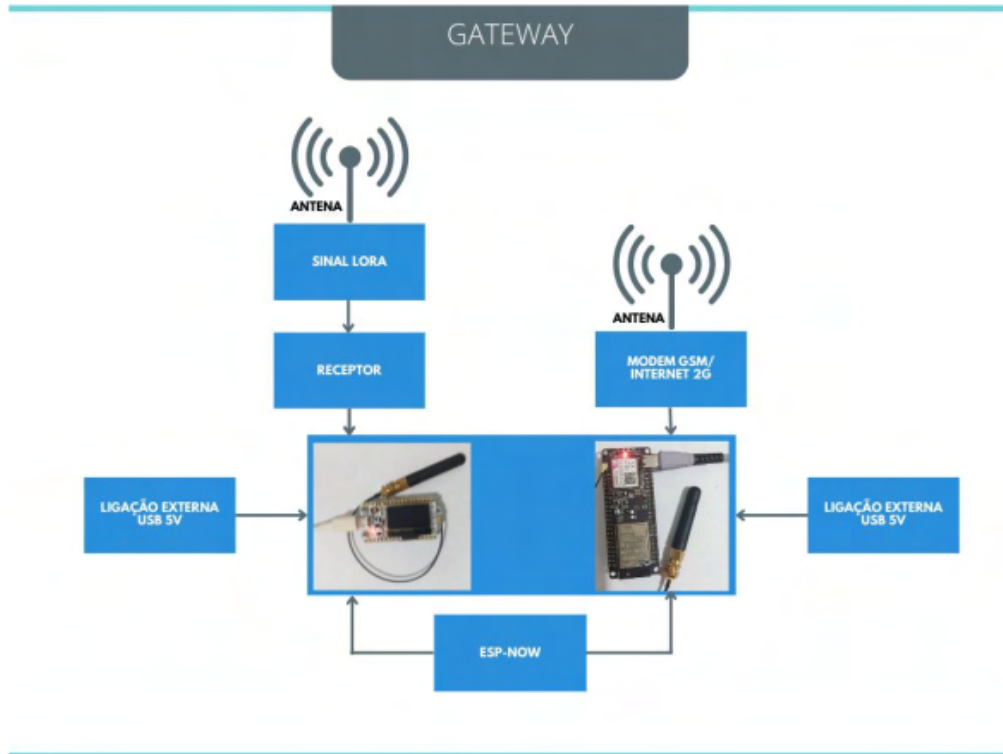
As Figuras 23, 24 e 25 ilustram diferentes aspectos do funcionamento da miniestação meteorológica de baixo custo, que aplica a tecnologia LoRa. A Figura 23 apresenta o fluxograma do dispositivo final, contendo os sensores, e detalha seu funcionamento. A Figura 24 mostra o fluxograma do *gateway*, responsável por receber os dados. Vale destacar que o TTGO T-Call desempenha um papel fundamental na composição do gateway, pois, por meio da conexão GSM, possibilita o gerenciamento dos dados enviados ao servidor. A comunicação entre o receptor LoRa e o TTGO T-Call ocorre via ESP-NOW, desenvolvido pela Espressif. Por fim, a Figura 25 exibe a interface de visualização dos dados armazenados na nuvem.

Figura 23 – Fluxograma de funcionamento do sistema do *end device*.



Fonte: (Germano, 2022)

Figura 24 – Fluxograma de funcionamento do sistema do *gateway*.



Fonte: (Germano, 2022)

Figura 25 – Dados em plataforma em nuvem.



Fonte: (Germano, 2022)

No entanto, o sistema utiliza uma comunicação ponto-a-ponto entre o dispositivo final e o *gateway*, o que limita a escalabilidade, já que a arquitetura não suporta múltiplos dispositivos conectados simultaneamente.

Em comparação, o presente trabalho utiliza o protocolo LoRaWAN, que oferece maior escalabilidade e flexibilidade. A arquitetura do sistema inclui um *gateway* de 8 canais, capaz de suportar múltiplos dispositivos finais (*end-devices*), configurados na classe A, que apresenta menor consumo energético em comparação com as classes B e C. Essa abordagem permite uma aplicação real e eficiente do LoRaWAN, viabilizando um ecossistema mais adequado para operações em larga escala.

No trabalho de (Germano, 2022), o uso de um *gateway* baseado em ESP32 e a comunicação ponto-a-ponto resultam em um sistema funcional, mas limitado em termos de escalabilidade. Em contrapartida, o presente trabalho prioriza o consumo energético otimizado, adotando dispositivos finais configurados na classe A do protocolo LoRaWAN, o que garante maior autonomia e eficiência para aplicações em áreas remotas.

Além disso, enquanto o trabalho relacionado depende da comunicação ponto-a-ponto, que exige maior controle sobre cada conexão individual, a infraestrutura LoRaWAN empregada no presente estudo possibilita a expansão do sistema sem comprometer sua eficiência. Isso torna a solução mais viável para aplicações em ambientes de grande cobertura e conectividade descentralizada.

O trabalho relacionado realiza testes para avaliar os limites de alcance da comunicação LoRa em diferentes tipos de regiões, garantindo a eficácia do sistema em ambientes rurais. Esses testes reforçam a adequação da tecnologia LoRa para transmissão de dados em longas distâncias.

O presente trabalho também utiliza a tecnologia LoRa, mas integrado ao protocolo LoRaWAN, diferenciando-se pelo foco na implantação de estações meteorológicas portáteis em locais estratégicos do sertão central. Esses dispositivos são projetados para mensurar parâmetros climáticos e ambientais, como precipitação, temperatura e umidade, fornecendo dados quantitativos detalhados sobre as condições climáticas locais. Esse ecossistema automatizado de coleta de dados representa um avanço significativo em relação ao trabalho relacionado, que não contempla sensores para monitoramento de precipitação.

Enquanto (Germano, 2022) não abrange o monitoramento de precipitação, o presente estudo implementa pluviômetros, que permitem quantificar com precisão o volume de chuva em

cada estação. Essa funcionalidade é essencial para análises detalhadas e gestão hídrica, sendo particularmente relevante no contexto do sertão central, onde informações sobre precipitação são fundamentais para a agricultura.

3.4 Comparativo entre os trabalhos relacionados

Nesta seção, é apresentada uma tabela que resume as principais características em comum entre os trabalhos analisados. A seleção dessas características foi baseada no propósito de cada estudo, destacando aspectos essenciais para a comparação.

Os critérios adotados para o comparativo incluem: o microcontrolador utilizado, os parâmetros climáticos monitorados, com ênfase na pluviometria, o local onde ocorre o processamento dos dados coletados e a tecnologia de comunicação empregada para a transmissão das informações até um concentrador.

O Quadro 1 apresenta a referência das características analisadas.

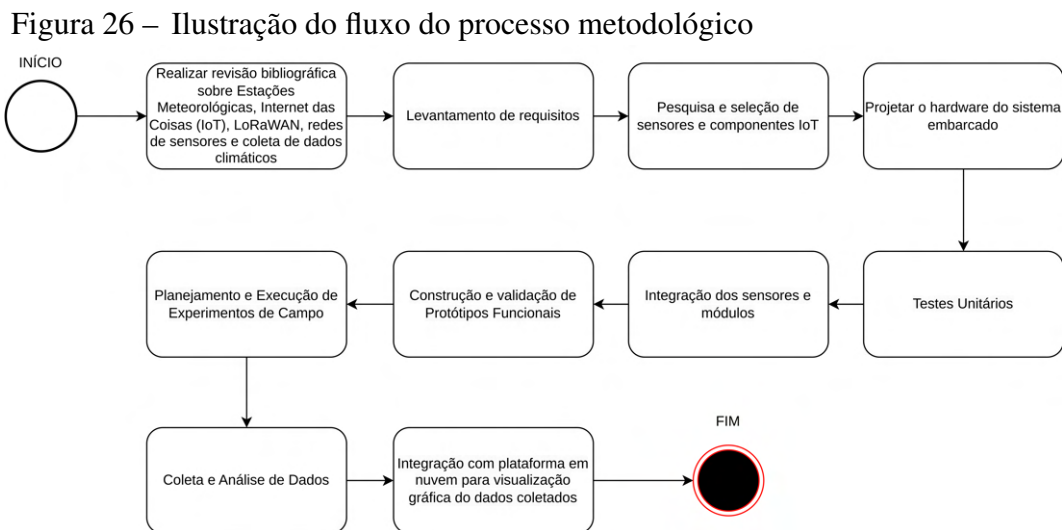
Quadro 1 – Análise comparativa dos trabalhos relacionados e deste projeto

Trabalho	Placa	Middleware	Precipitação	Tipo de comunicação sem fio
(Meneses, 2023)	Arduino + ESP01	ThingSpeak	Não	Wi-Fi
(Moreira, 2019)	ESP32	Não informado	Não	Wi-Fi
(Germano, 2022)	ESP32 WiFi LoRa 32 v2	ThingSpeak	Não	LoRa
Presente trabalho	RP2040-zero Waveshare	FIWARE	Sim	LoRaWAN e MQTT

Fonte: Elaborado pelo autor.

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos utilizados para alcançar os objetivos definidos neste trabalho. A metodologia abrange desde a realização de pesquisas preliminares até a integração de sensores e módulos IoT, além da montagem do sistema final. As etapas não seguem, necessariamente, um fluxo linear, podendo ser temporariamente interrompidas para avançar em outras atividades, como codificação e testes, com a possibilidade de retomada quando necessário. Essa flexibilidade permite um processo mais adaptado às necessidades do projeto. A Figura 26 ilustra o fluxo do processo.



Fonte: Autor

4.1 Revisão da literatura

Uma das primeiras etapas, consideradas fundamentais no desenvolvimento do projeto, será a realização de uma revisão da literatura. Esta revisão tem como objetivo identificar e analisar as pesquisas mais relevantes e atuais sobre sistemas embarcados que se assemelhavam à ideia do projeto. Foram utilizadas bases de dados acadêmicas para realizar buscas utilizando palavras-chave pertinentes ao tema, como "estação meteorológica", "sistemas embarcados", "LoRa" e "Internet das Coisas".

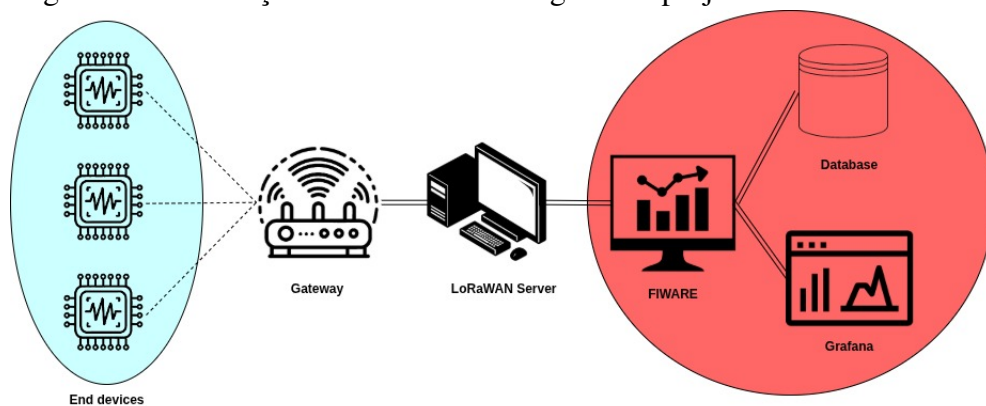
4.2 Levantamento de requisitos

Este procedimento tem como objetivo definir os requisitos funcionais e não-funcionais do hardware e software do sistema. Os requisitos foram baseados nos conhecimentos prévios em programação de *firmware* e pesquisas em diversas fontes sobre monitoramento climático.

O sistema proposto será um ecossistema integrado para monitoramento ambiental e climático, utilizando a tecnologia LoRa. Ele será composto por um pluviômetro para medir a precipitação, sensores de precisão para temperatura e umidade, um módulo LoRa para comunicação e um microcontrolador (MCU), responsável pelo processamento e envio dos dados por meio do módulo LoRa.

Esses componentes permitirão captar os parâmetros climáticos no ambiente onde o sistema for instalado e transmitir os dados coletados via LoRa, utilizando uma infraestrutura LoRaWAN. Essa estrutura garante eficiência e alcance em áreas remotas, atendendo aos objetivos do projeto. A Figura 27 ilustra o funcionamento geral descrito.

Figura 27 – Ilustração do funcionamento geral do projeto



Fonte: Autor

O levantamento de requisitos foi realizado com base nas necessidades do sistema de monitoramento climático, levando em consideração aspectos como:

- Parâmetros climáticos a serem monitorados (temperatura, umidade e precipitação);
- Infraestrutura necessária para a instalação dos dispositivos IoT;
- Requisitos técnicos para garantir a operação contínua e eficiente do sistema.

Para essa etapa, foram realizadas reuniões com especialistas na área de meteorologia, a fim de mapear os requisitos específicos para a operação do sistema em campo.

Dessa forma, no Quadro 2 são apresentados os principais requisitos identificados e definidos para o sistema proposto.

Quadro 2 – Levantamento de Requisitos

Requisitos Funcionais	Requisitos Não Funcionais
O sistema deve enviar dados para a plataforma FIWARE para processamento em nuvem.	A interface da plataforma Grafana deve ser fácil de usar, permitindo que usuários possam visualizar dados de forma remota.
O sistema deve permitir a visualização de dados através de dashboards no Grafana.	O sistema deve ser eficiente no uso de energia para garantir um longo tempo de operação com a bateria.
O sistema deve coletar automaticamente parâmetros climáticos (temperatura, umidade e precipitação) em intervalos regulares.	A solução deve ser escalável para permitir a implantação de múltiplas miniestações em diferentes locais.
O sistema deve alternar entre modo ativo e estado de baixo consumo (deep sleep) para economia de energia.	A transmissão de dados via LoRaWAN deve ser segura, com criptografia para evitar interceptações ou alterações nos dados.
O sistema deve ser religado periodicamente a cada 60 minutos utilizando um módulo RTC externo.	O sistema deve ser de baixo custo de implementação e manutenção, para viabilizar o uso em larga escala.
O sistema deve transmitir dados via tecnologia LoRa utilizando o protocolo LoRaWAN para o gateway.	O sistema deve ser capaz de operar continuamente durante longos períodos de tempo (meses ou anos).
O sistema deve ser alimentado por bateria recarregável via painel fotovoltaico.	A miniestação deve ser projetada para suportar as condições climáticas locais (chuva, calor, etc.), com proteção contra intempéries.
	A transmissão de dados via LoRaWAN deve ser eficiente, com tempos de latência mínimos entre a coleta e o envio dos dados.
	O sistema deve ser fácil de instalar e configurar no local desejado, com um processo de calibração simples dos sensores.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 Seleção dos Componentes

A seleção dos componentes foi baseada em uma revisão bibliográfica detalhada e na análise das necessidades específicas do sistema proposto. Foram priorizados sensores e módulos com alta precisão e baixo consumo energético, critérios avaliados por meio das folhas de dados de cada componente, garantindo a eficiência e durabilidade necessárias para o sucesso do projeto. A escolha dos componentes seguiu critérios técnicos rigorosos, como precisão, eficiência energética e resistência a condições adversas.

4.3.1 Sensor SHT30

O SHT30 destaca-se por sua capacidade de detectar temperatura e umidade com elevada precisão, além de operar com baixo consumo energético. Um diferencial importante desse sensor é sua proteção contra poeira e umidade, classificada como IP44, permitindo sua utilização em ambientes externos e sujeitos a condições climáticas adversas.

A Figura 28 mostra o sensor de temperatura e umidade a ser utilizado nos protótipos.

Figura 28 – Sensor SHT30 impermeável.



Fonte: (SMART KITS, 2025b)

Em comparação com sensores amplamente utilizados para medições ambientais, como o DHT22, o SHT30 apresenta um tempo de resposta menor, maior precisão e menor consumo de energia. Isso o torna mais adequado para aplicações que exigem monitoramento contínuo e de longo prazo, além de oferecer uma maior resistência a intempéries, fator essencial para ambientes externos.

Tabela 1 – Comparação entre os sensores DHT22 e SHT30.

Parâmetro	DHT22	SHT30
Protocolo de Comunicação	One-wire	I ² C
Faixa de Temperatura	-40 °C a 80 °C	-40 °C a 125 °C
Faixa de Umidade	0 a 100% RH	0 a 100% RH
Precisão de Temperatura	±0.5 °C	±0.3 °C
Precisão de Umidade	±2% RH (máx. ±5% RH)	±3% RH
Tensão de Operação	3.3 V a 6 V	2.4 V a 5.5 V
Consumo de Corrente	1.5 mA	220–350 μA

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 *Sensor Hall*

O sensor 3144E, baseado no efeito Hall, foi selecionado para a detecção de campos magnéticos, desempenhando um papel essencial na medição de posição e velocidade angular. No sistema desenvolvido, esse sensor será utilizado para registrar o basculamento do pluviômetro, detectando a mudança no campo magnético à medida que a balsa completa seu ciclo de enchimento e esvaziamento. A instalação do sensor de efeito Hall será feita de forma centralizada

no balde basculante do protótipo. Durante o basculamento da água, um ímã de neodímio posicionado na estrutura da balança passará rapidamente pelo sensor, permitindo a detecção instantânea do campo magnético. A cada detecção, um pulso elétrico será gerado, contabilizando automaticamente a precipitação acumulada no pluviômetro.

A Figura 29 mostra o sensor magnético de efeito Hall 3144E a ser utilizado nos protótipos.

Figura 29 – Sensor de efeito Hall.



Fonte: (AUTOCORE ROBÓTICA, 2025)

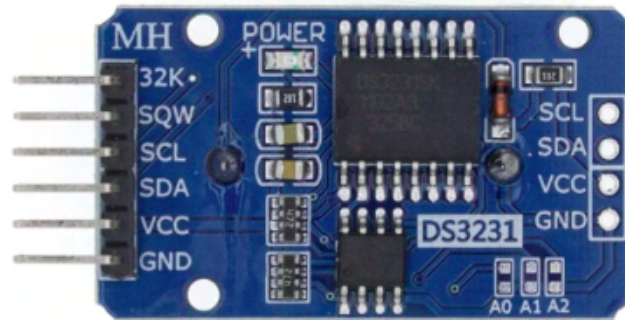
A escolha desse sensor foi motivada por sua precisão na detecção de variações magnéticas, além da capacidade de operar com baixo consumo de energia, fator essencial para aplicações que requerem monitoramento contínuo e eficiente.

4.3.3 Módulo RTC

O módulo Real-Time Clock (RTC) DS3231 é um dispositivo de contagem de tempo de alta precisão, projetado para manter a sincronização de segundos, minutos, horas, dias da semana, dias do mês, meses e anos (entre 2000 e 2099), mesmo durante interrupções no fornecimento de energia elétrica, graças à sua bateria interna de reserva. Este módulo é amplamente utilizado em sistemas embarcados que exigem uma cronometragem precisa e confiável, como em dispositivos de monitoramento, sistemas de data e hora e dispositivos de registro temporal (ELETROGATE, 2024).

A Figura 30 ilustra o módulo DS3231, que foi integrado no protótipo desenvolvido.

Figura 30 – Módulo DS3231 RTC.



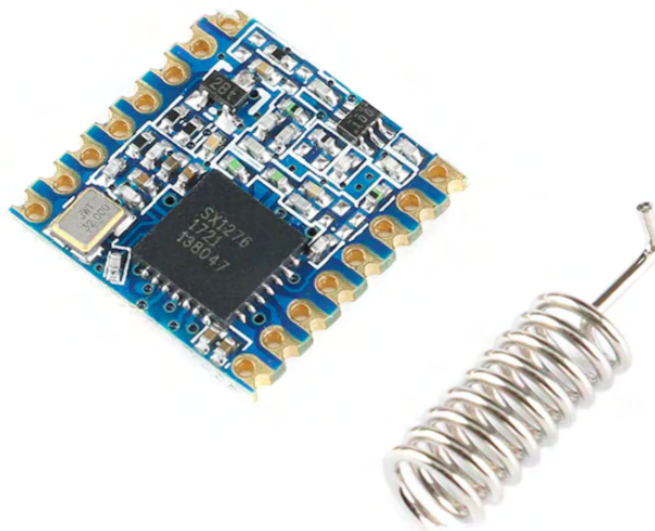
Fonte: (ELETROGATE, 2024)

4.3.4 SX1276

O módulo LoRa SX1276 é um transceptor de rádio de longo alcance que opera na faixa de frequência de 915 MHz, sendo amplamente utilizado em sistemas de comunicação sem fio de baixa potência e longo alcance, como os encontrados em redes LoRaWAN. Este módulo oferece robustez e confiabilidade para a transmissão de dados em ambientes de difícil alcance, como áreas urbanas densas ou regiões remotas (SMART KITS, 2025a).

A Figura 31 ilustra o módulo LoRa SX1276, que foi integrado no protótipo desenvolvido.

Figura 31 – Módulo LoRa SX1276.



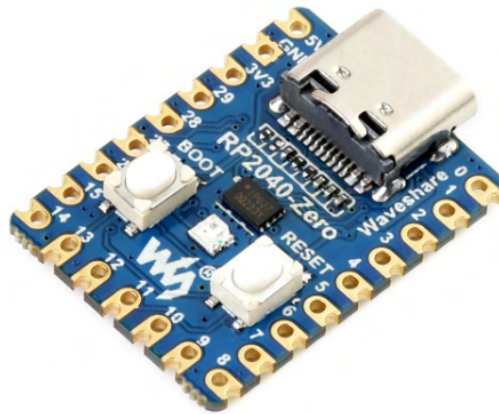
Fonte: (SMART KITS, 2025b)

4.3.5 Microcontrolador RP2040

O microcontrolador escolhido para a implementação é o RP2040 Waveshare Pico-Zero, uma versão reduzida do microcontrolador Raspberry Pi Pico, que possui um processador ARM Cortex M0+, tipicamente utilizado em aplicações de baixo consumo energético.

A Figura 32 apresenta microcontrolador que será utilizado para fazer o controle de coleta e transmissão de dados dos parâmetros ambientais e climáticos do presente trabalho.

Figura 32 – Microcontrolador RP2040 Pico-Zero.



Fonte: (WAVESHARE, 2025)

4.4 Distribuição de Componentes e Modelagem 3D

Com a seleção dos componentes finalizada, a próxima etapa é a projeção dos protótipos do sistema embarcado, envolvendo o desenvolvimento de modelos e estruturas essenciais para seu funcionamento. Um dos elementos críticos desta fase é o pluviômetro, responsável pela medição precisa e confiável da precipitação. Para isso, foi realizada a sua modelagem em 3D, considerando aspectos mecânicos e estruturais que garantam sua funcionalidade. A calibração mecânica será indispensável para reduzir falsos positivos e negativos, assegurando a coleta de dados precisos e alinhados aos requisitos do sistema.

Após a seleção dos componentes principais, iniciou-se a fase da montagem do circuito do protótipo. O Quadro 3, mostra os materiais principais componentes utilizados.

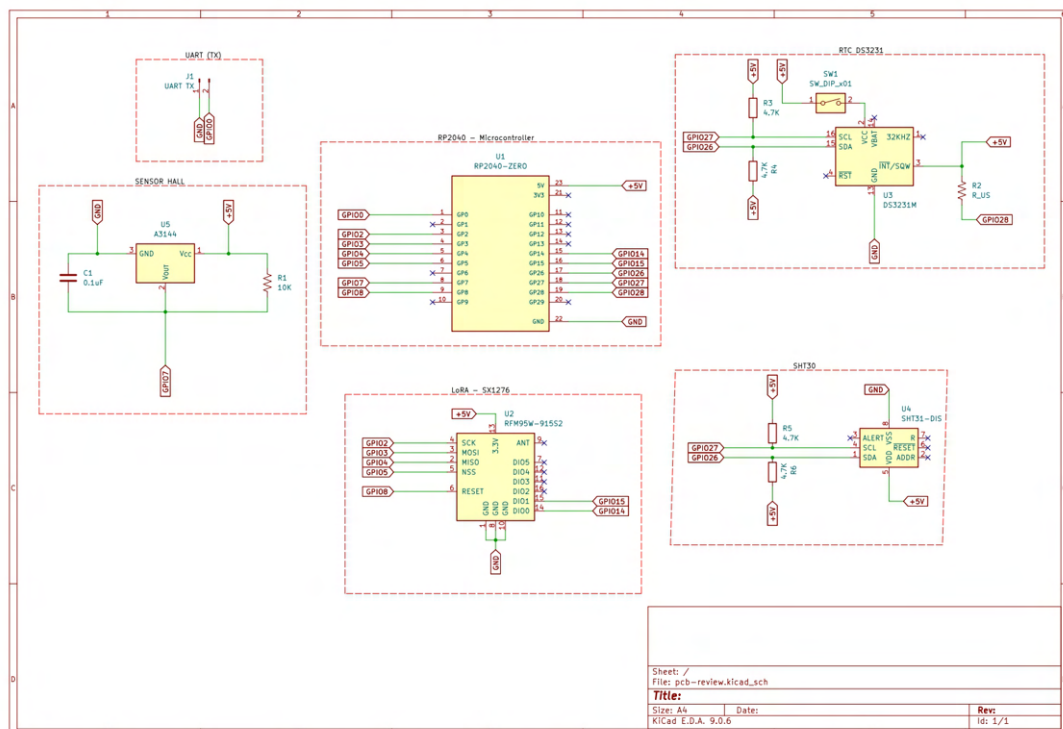
Quadro 3 – Principais Materiais Utilizados e suas Funções

Material	Função
Impressora 3D	Equipamento para realizar as impressões.
Filamento ABS	Material selecionado para impressão de peças.
Sensor SHT30	Medir temperatura e umidade com precisão.
Sensor Hall A3144	Detecta mudança no campo magnético quando o balde oscila.
Módulo DS3231	Configura o período de trabalho do MCU.
MCU RP2040	Processa dados coletados dos sensores.
Protoboard	Montagem e testes de circuitos.
Módulo SX1276	Componente para transmissão sem fio.
Placa Fenolite Perfurada	Montagem do hardware do sistema embarcado.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Antes da montagem do circuito para os primeiros testes de bancada, foi elaborado um planejamento do esquemático, baseado no design do circuito da Placa de Circuito Impresso (PCB), definindo a disposição dos componentes e suas conexões. O esquemático utilizado está representado na Figura 33.

Figura 33 – Esquemático do sistema embarcado.



Fonte: Autor.

4.4.1 Desenvolvimento do Hardware

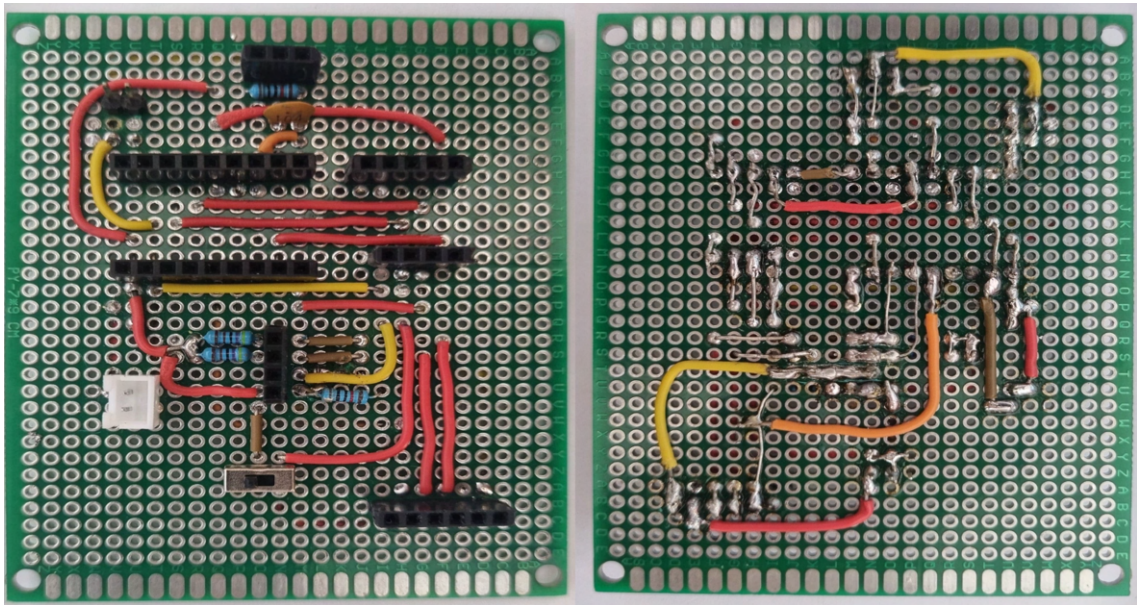
Com base no esquemático desenvolvido no KiCad, o próximo passo foi a fabricação da Placa de Circuito Impresso (PCB) para o sistema embarcado. Inicialmente, optou-se pela utilização de uma placa fenolite de cobre, que permitiria a fabricação da PCB por meio do processo de transferência de circuito utilizando papel fotográfico. O layout do circuito, projetado no KiCad, era impresso em papel fotográfico com uma impressora a laser e, posteriormente, transferido para a placa de fenolite de cobre aquecida. O calor da placa de cobre fazia com que o toner impresso no papel fotográfico aderisse à superfície do cobre, formando a máscara para as trilhas do circuito.

Após a transferência, a placa era mergulhada em uma solução de cloreto férrico para remover o cobre não protegido, deixando apenas as trilhas visíveis e conectando os componentes. No entanto, este processo encontrou desafios devido à falta de equipamentos adequados, como uma impressora a laser de alta qualidade e um cortador de placa de fenolite para ajustes precisos. Além disso, o alinhamento entre as camadas superior e inferior da PCB foi difícil de executar sem os equipamentos necessários, resultando em falhas no processo.

Diante das dificuldades com a primeira abordagem, uma segunda abordagem foi adotada: o uso de uma placa fenolite perfurada duplamente, já com furos predefinidos. Essa solução facilitou significativamente a montagem do protótipo, pois os furos já estavam posicionados de maneira estratégica para a inserção dos terminais dos componentes. Com a placa perfurada, o foco mudou para a soldagem das trilhas e a distribuição eficiente dos componentes, com a necessidade de evitar ao máximo o cruzamento das trilhas para não gerar interferência elétrica.

Com a placa perfurada, as trilhas foram conectadas manualmente por meio de soldagem com fios rígidos e ferro de solda. Durante esse processo, foi necessário manter a precisão nas conexões para garantir a integridade elétrica do circuito. A montagem foi bem-sucedida, e a Figura 34 ilustra o resultado final da PCB, que passou por uma série de testes de verificação das conexões dos componentes em laboratório.

Figura 34 – PCB do sistema embarcado.



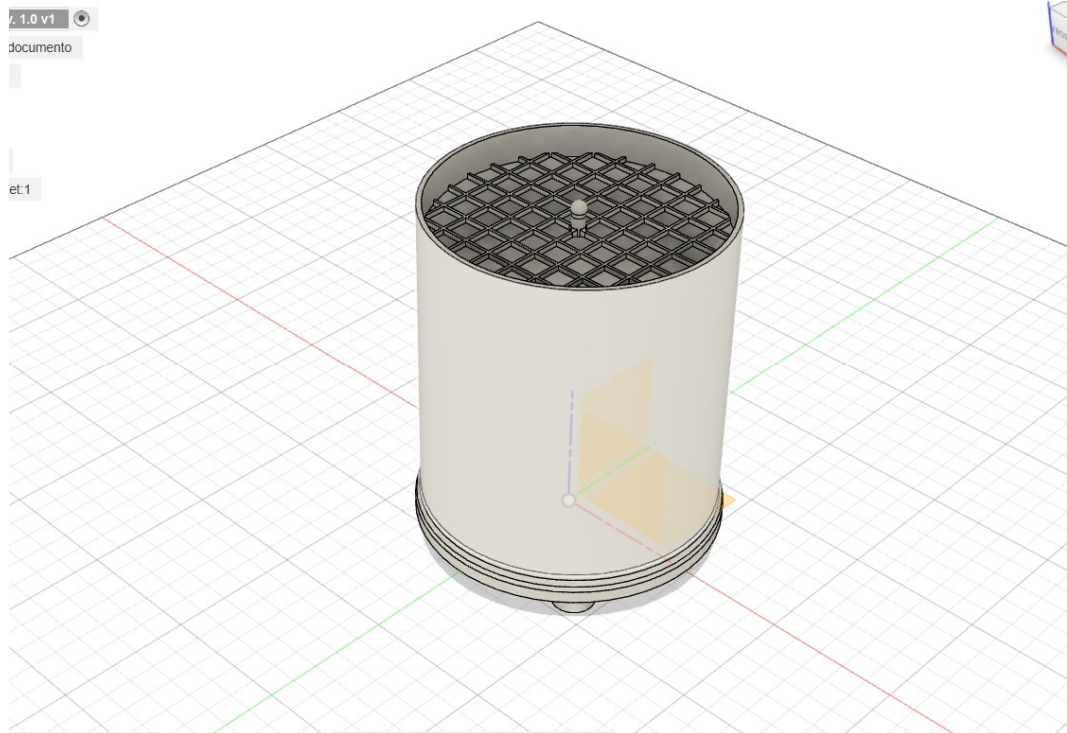
Fonte: Autor.

4.4.2 Modelagem 3D do Pluviômetro

Para a medição de precipitação no presente trabalho, foi utilizada a primeira versão do modelo 3D dos pluviômetros, já desenvolvido e disponível para fabricação por impressão 3D. O modelo original foi adaptado da fonte (SMART SOLUTIONS 4 HOME, 2025), o que proporcionou a base inicial para as modificações realizadas no software *Autodesk Fusion*. O material escolhido para a impressão foi o Acrilonitrila Butadieno Estireno (ABS), devido à sua alta resistência mecânica e estabilidade sob exposição solar.

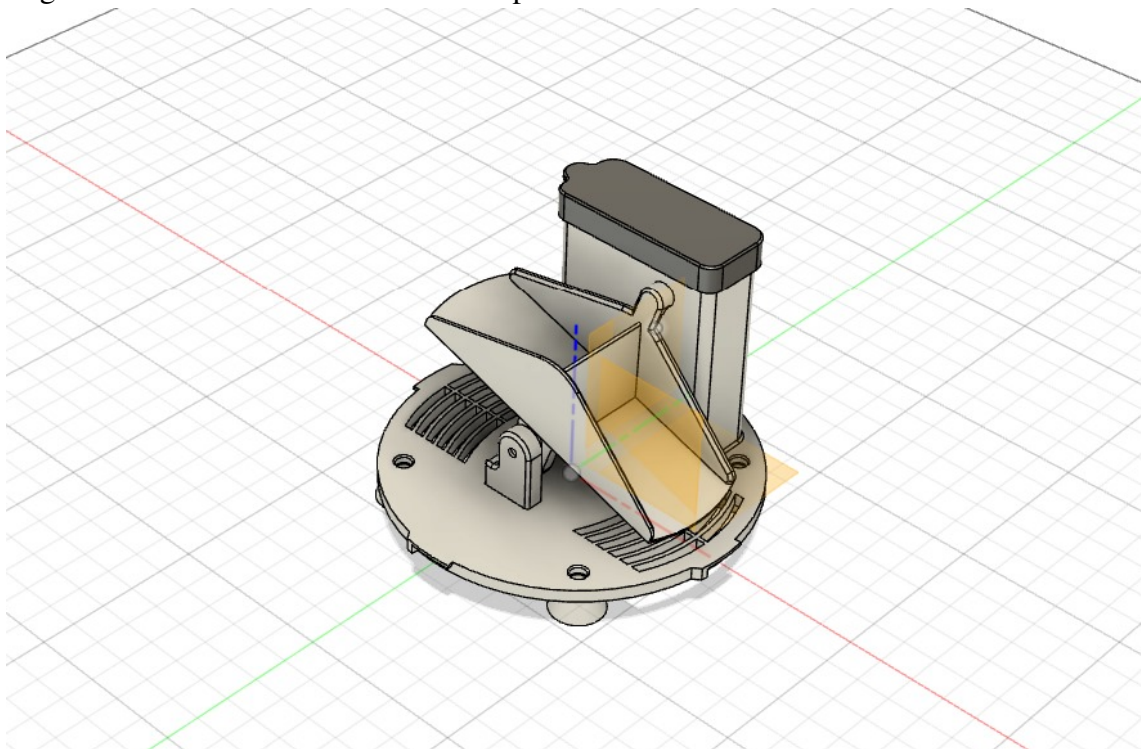
As Figuras 35 e 36 apresentam as renderizações da versão atualizada do modelo e detalham este mecanismo.

Figura 35 – Primeira versão do modelo 3D do pluviômetro.



Fonte: Adaptado de (SMART SOLUTIONS 4 HOME, 2025)

Figura 36 – Mecanismo basculante do pluviômetro.



Fonte: Adaptado de (SMART SOLUTIONS 4 HOME, 2025)

A versão completa é ilustrada no Capítulo 5.

Calibração do Pluviômetro

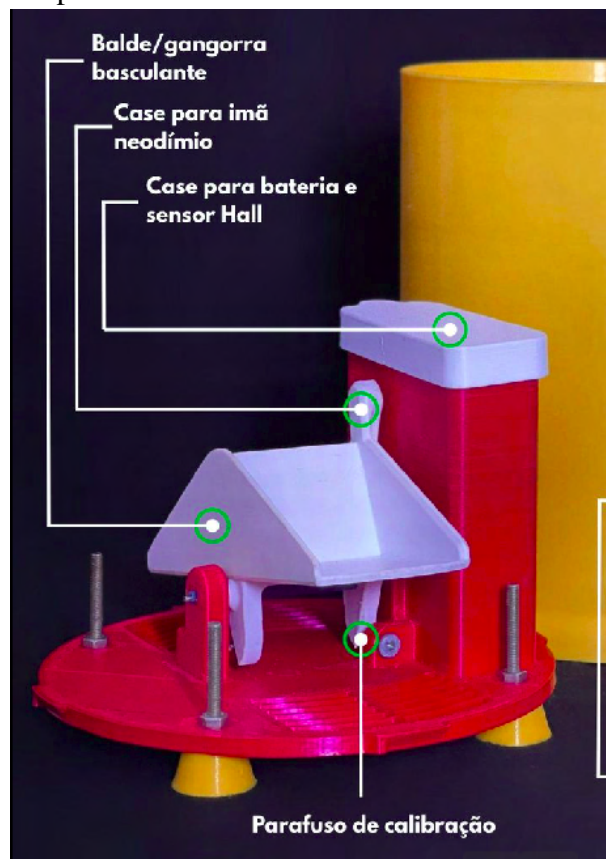
Para garantir a precisão do pluviômetro descrita anteriormente, é fundamental que ambos os baldes basculantes sejam geometricamente idênticos e balanceados. A calibração mecânica é efetuada ajustando-se dois parafusos localizados sob cada balde. Esses parafusos controlam simultaneamente o nível de equilíbrio e a sensibilidade física do mecanismo: quanto menor o volume de água acumulado necessário para ativar o basculamento, mais ágil será a resposta ao sensor.

O procedimento de calibração consiste em:

1. Verificar a simetria estrutural dos baldes e eliminar quaisquer folgas ou desalinhamentos.
2. Girar progressivamente os parafusos de ajuste até que cada balde reaja à mesma massa de água, medindo-se o volume necessário para o acionamento em ambos os lados.

A Figura 37 ilustra o arranjo dos parafusos de calibração e o mecanismo de basculamento do pluviômetro.

Figura 37 – Mecanismo de calibração mecânica do pluviômetro.



Fonte: Adaptado de (SMART SOLUTIONS 4 HOME, 2025)

Mensurando a Precipitação

O princípio fundamental para a medição da precipitação, conforme estabelecido pela OMM, é a relação direta entre o volume de água (v) coletado e a área de captação (S) do instrumento, que resulta na altura da precipitação (\hat{h}) (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2018). Este princípio é formalizado na Seção 6.2.3.1 do manual, através da Equação 6.2: $V = \hat{h} \cdot S$.

Para calcular a altura da precipitação (em mm) representada por uma única inclinação do balde, é necessário conhecer dois parâmetros: o raio da entrada do funil (r) e o volume de água (v) que faz o balde bascular (SMART SOLUTIONS 4 HOME, 2025). Enquanto o primeiro parâmetro é constante, o segundo pode ser ajustado conforme a calibração do dispositivo.

Para este cálculo, é essencial que as unidades sejam consistentes. Assumimos que o raio (r) é medido em centímetros (cm) e o volume (v) é medido em mililitros (mL), sendo $1 \text{ mL} = 1 \text{ cm}^3$.

Primeiro, calcula-se a área da seção transversal da entrada do funil (S) em centímetros quadrados (cm^2):

$$S = \pi r^2 \quad (4.1)$$

Em seguida, a altura da precipitação (\hat{h}) em centímetros (cm) é calculada dividindo-se o volume de água (v) pela área de captação (S):

$$\hat{h}_{\text{cm}} = \frac{v}{S} \quad (4.2)$$

Como a unidade padrão para precipitação é milímetros (mm), o resultado anterior é multiplicado por 10. A altura da precipitação por ciclo (\hat{h}_{mm}) é, portanto:

$$\hat{h}_{\text{mm}} = \left(\frac{v}{S} \right) \cdot 10 \quad (4.3)$$

Onde:

- r é o raio da entrada do funil (em cm),
- S é a área da seção transversal da entrada do funil (em cm^2),
- v é o volume de água necessário para a inclinação (em mL ou cm^3),

– \hat{h}_{mm} é a altura da precipitação por ciclo (em mm).

Cada inclinação do balde corresponde, assim, a \hat{h}_{mm} milímetros (mm) de "coluna de água".

4.5 Testes Unitários

Nesta etapa, inicia-se o desenvolvimento do *firmware*, com a codificação individual dos sensores e módulos para realização de testes e depuração. Em particular, o sensor de efeito Hall será testado em conjunto com o protótipo do pluviômetro, que contém um ímã na parte superior do balde basculante. O sensor detecta a variação do campo magnético sempre que o balde tomba após atingir sua capacidade máxima, permitindo a contagem dos basculamentos e, conseqüentemente, o cálculo da precipitação.

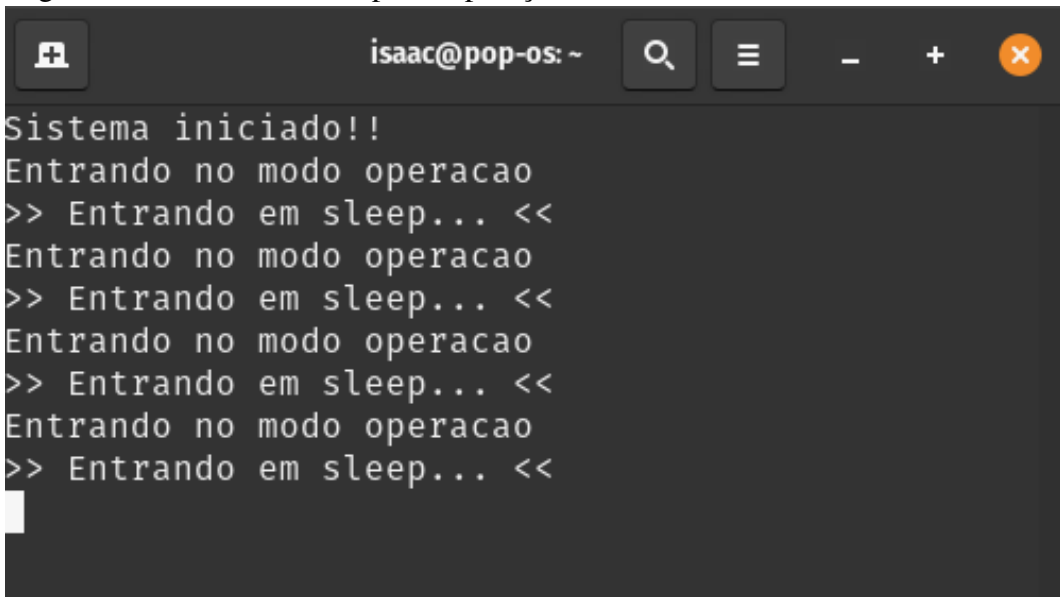
4.5.1 Módulo DS3231 e RP2040

Este teste tem como objetivo verificar a configuração do módulo DS3231 para gerar um pulso digital a cada 10 segundos no pino SQW (*Square Wave*), para ativar o microcontrolador que está em modo de deep sleep. O microcontrolador deve permanecer ativo por 3000 ms e, em seguida, voltar ao modo de deep sleep.

Durante o teste, o módulo DS3231 é configurado por meio de comunicação I²C para gerar os pulsos no pino SQW, o que acorda o microcontrolador que estava em deep sleep. Quando o microcontrolador é acordado, ele permanece ativo por 3000 ms, como esperado, antes de retornar ao modo de deep sleep. As imagens a seguir mostram a análise dos sinais durante o teste.

A Figura 38 mostra o comportamento do sistema no terminal serial durante a comunicação com o DS3231.

Figura 38 – Terminal serial para depuração com DS3231.



```

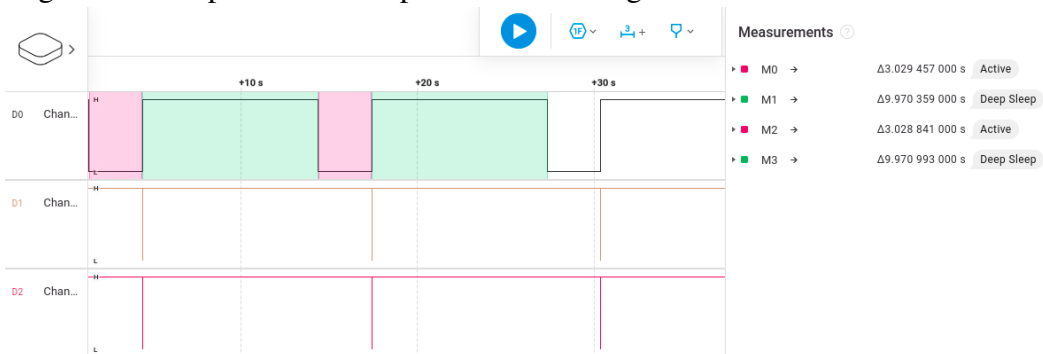
isaac@pop-os: ~
Sistema iniciado!!
Entrando no modo operacao
>> Entrando em sleep... <<
Entrando no modo operacao
>> Entrando em sleep... <<
Entrando no modo operacao
>> Entrando em sleep... <<
Entrando no modo operacao
>> Entrando em sleep... <<
Entrando no modo operacao
>> Entrando em sleep... <<

```

Fonte: Autor.

A Figura 39 exibe a captura dos sinais do pino SQW e da comunicação I²C pelo analisador lógico. Os canais CH0, CH1 e CH2 estão conectados, respectivamente, ao pino SQW, SCL e SDA do DS3231. As regiões verdes representam o estado de deep sleep do microcontrolador, enquanto as regiões vermelhas indicam o momento em que o microcontrolador está ativo, processando dados por 3000 ms após receber o pulso do pino SQW.

Figura 39 – Captura de sinais pelo analisador lógico.



Fonte: Autor.

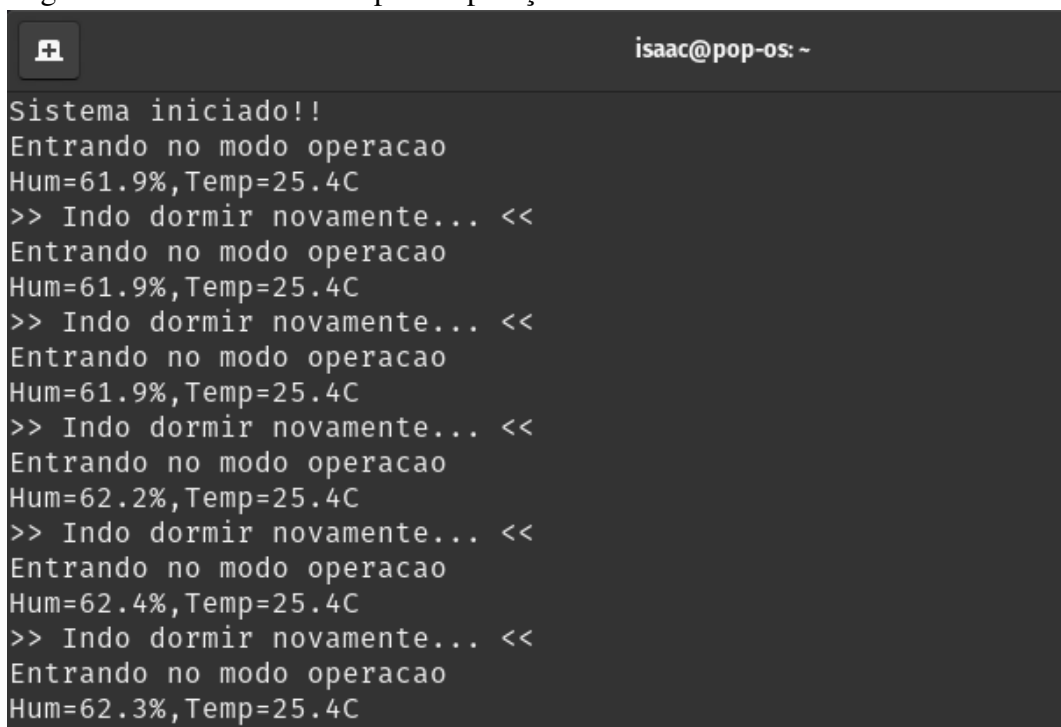
A análise da comunicação I²C e do comportamento do microcontrolador, conforme mostrado nos gráficos, confirma que o DS3231 está funcionando corretamente, gerando o pulso a cada 10 segundos e permitindo a transição correta entre os estados de deep sleep e ativo.

4.5.2 Sensor SHT30

O objetivo deste teste é verificar a configuração e o funcionamento do sensor de temperatura e umidade de precisão SHT30, utilizando o barramento de comunicação I²C. O sensor foi configurado para garantir que a leitura da temperatura e umidade fosse precisa e compatível com os requisitos do sistema. Durante os testes, foram realizadas medições em diferentes condições ambientais para verificar a estabilidade e a precisão dos dados fornecidos pelo sensor. A comunicação entre o sensor e o microcontrolador foi monitorada de forma similar ao módulo DS3231, para assegurar que os dados fossem transmitidos corretamente através do barramento I²C.

A Figura 40 mostra o comportamento do sistema no terminal serial durante a comunicação com o SHT30.

Figura 40 – Terminal serial para depuração com SHT30.

A screenshot of a terminal window with a dark background. The title bar shows a window icon and the text 'isaac@pop-os: ~'. The terminal output consists of several lines of text: 'Sistema iniciado!!', 'Entrando no modo operacao', 'Hum=61.9%,Temp=25.4C', '>> Indo dormir novamente... <<', 'Entrando no modo operacao', 'Hum=61.9%,Temp=25.4C', '>> Indo dormir novamente... <<', 'Entrando no modo operacao', 'Hum=61.9%,Temp=25.4C', '>> Indo dormir novamente... <<', 'Entrando no modo operacao', 'Hum=62.2%,Temp=25.4C', '>> Indo dormir novamente... <<', 'Entrando no modo operacao', 'Hum=62.4%,Temp=25.4C', '>> Indo dormir novamente... <<', 'Entrando no modo operacao', and 'Hum=62.3%,Temp=25.4C'.

```
isaac@pop-os: ~
Sistema iniciado!!
Entrando no modo operacao
Hum=61.9%,Temp=25.4C
>> Indo dormir novamente... <<
Entrando no modo operacao
Hum=61.9%,Temp=25.4C
>> Indo dormir novamente... <<
Entrando no modo operacao
Hum=61.9%,Temp=25.4C
>> Indo dormir novamente... <<
Entrando no modo operacao
Hum=62.2%,Temp=25.4C
>> Indo dormir novamente... <<
Entrando no modo operacao
Hum=62.4%,Temp=25.4C
>> Indo dormir novamente... <<
Entrando no modo operacao
Hum=62.3%,Temp=25.4C
```

Fonte: Autor.

Os testes realizados indicaram que o SHT30 responde de forma consistente às variações de temperatura e umidade observadas durante os ensaios, demonstrando que o sensor está corretamente configurado e pronto para ser integrado ao sistema de coleta de dados meteorológicos.

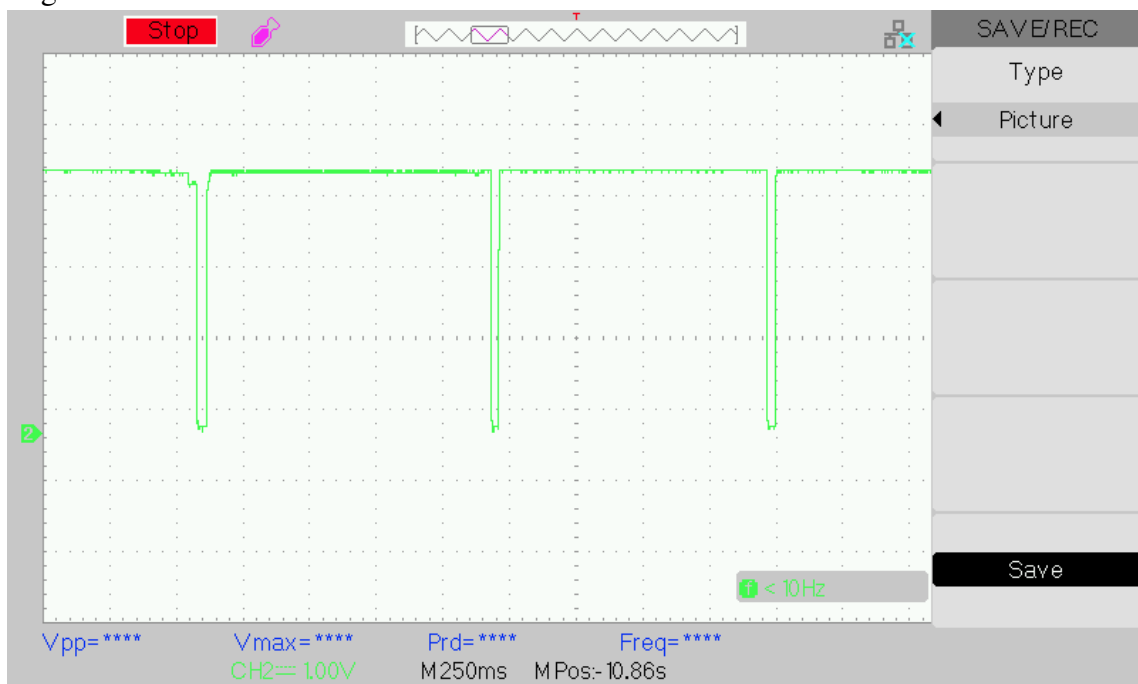
4.5.3 Sensor A3144

O teste do sensor de efeito Hall A3144 teve como objetivo verificar seu funcionamento e configuração para detectar o movimento de um ímã de neodímio no balde basculante. O sensor foi instalado centralizadamente no balde para garantir detecção precisa durante seu movimento.

O teste foi realizado simulando precipitação com uma seringa, fazendo o ímã passar rapidamente pelo sensor. Além disso, foi realizado um teste manual, no qual o balde foi movido manualmente para estimular o ímã e verificar a resposta do sensor.

A Figura 41 mostra o comportamento do sistema no osciloscópio durante a comunicação com o sensor Hall.

Figura 41 – Análise do sinal com o sensor Hall.



Fonte: Autor.

O sensor A3144 respondeu de maneira confiável, gerando sinais precisos e com tempo de resposta adequado, tanto em condições automáticas quanto manuais, garantindo seu bom desempenho no controle da medição de precipitação.

4.5.4 Módulo SX1276

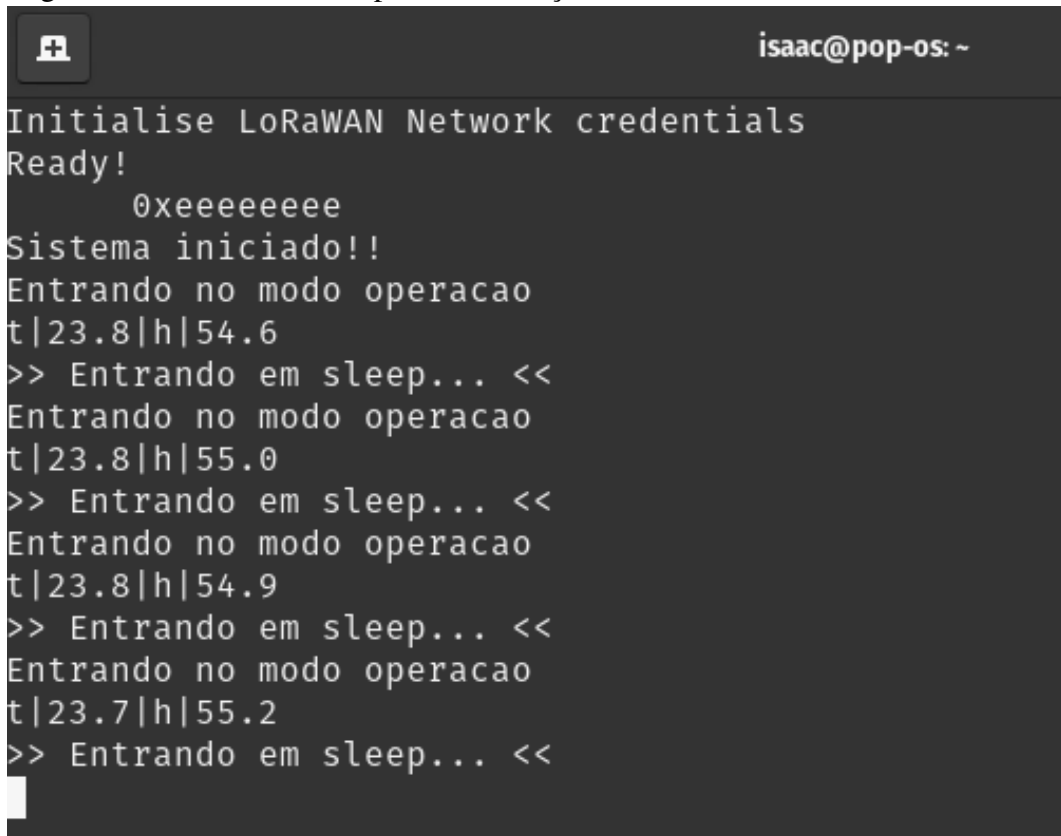
O objetivo deste teste é validar a comunicação com o módulo SX1276, responsável pela transmissão via LoRa. O módulo foi configurado com credenciais apropriadas para

estabelecer uma conexão com o *gateway* já instalado no campus UFC Quixadá, assegurando a transmissão bem-sucedida de dados entre o dispositivo e a rede.

A transmissão de dados foi realizada em bancada com informações do sensor SHT30, previamente testado, a fim de verificar a eficiência da rede LoRaWAN na transmissão de dados sensoriais.

A Figura 42 apresenta a captura de tela do terminal serial, onde é possível observar a inicialização do módulo LoRa e o processo de configuração das credenciais. O módulo SX1276 é configurado para realizar a autenticação no *gateway* por meio do protocolo LoRaWAN. Este processo permite a troca de dados entre os dispositivos e a rede LoRaWAN, utilizando o protocolo de comunicação sem fio de longo alcance.

Figura 42 – Terminal serial para visualização local.

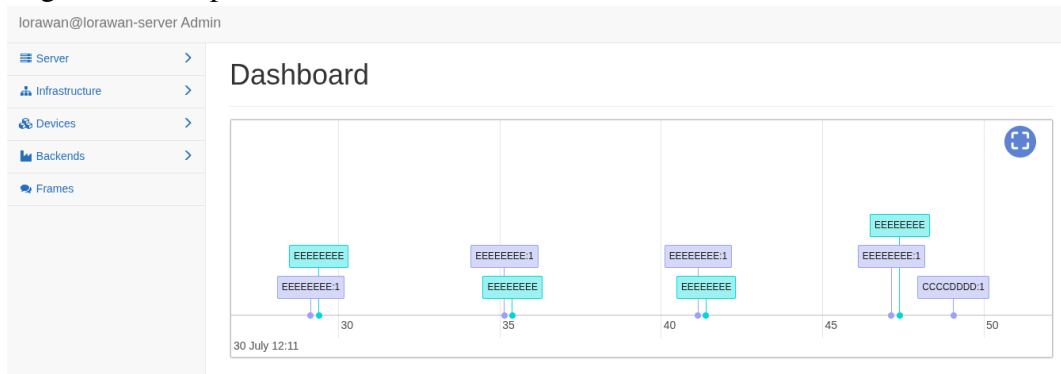
A screenshot of a terminal window titled 'isaac@pop-os: ~'. The terminal output shows the following text:

```
Initialise LoRaWAN Network credentials
Ready!
      0xeeeeeeee
Sistema iniciado!!
Entrando no modo operacao
t|23.8|h|54.6
>> Entrando em sleep... <<
Entrando no modo operacao
t|23.8|h|55.0
>> Entrando em sleep... <<
Entrando no modo operacao
t|23.8|h|54.9
>> Entrando em sleep... <<
Entrando no modo operacao
t|23.7|h|55.2
>> Entrando em sleep... <<
```

Fonte: Autor.

A Figura 43 mostra o dashboard do Network Server, onde é possível monitorar e controlar as conexões dos dispositivos LoRaWAN. Esta interface fornece uma visão em tempo real do status de comunicação, permitindo a gestão eficiente da rede e a visualização do status de cada dispositivo conectado.

Figura 43 – Captura de tela do dashboard do Network Server.



Fonte: Autor.

A Figura 44 apresenta a captura de tela do Network Server, onde é possível visualizar os dados recebidos pelos dispositivos conectados à rede LoRaWAN. Esses dados são gerados a partir da comunicação entre o dispositivo com o módulo SX1276 e o *gateway* LoRaWAN.

Figura 44 – Visualização de dados no Servidor.

<input type="checkbox"/>	↑	2025-07-30 12:11:47	Generic Handler	EEEEEEEE	B827EB0000853FF6	-112 3.5	3	✘	1	747C32332E377C687C35352E32
<input type="checkbox"/>	↓	2025-07-30 12:11:41	Generic Handler	EEEEEEEE	B827EB0000853FF6		3	✘		[ASCII] t 23.7 h 55.2
<input type="checkbox"/>	↑	2025-07-30 12:11:41	Generic Handler	EEEEEEEE	B827EB0000853FF6	-103 7.5	2	✘	1	747C32332E387C687C35342E39
<input type="checkbox"/>	↓	2025-07-30 12:11:35	Generic Handler	EEEEEEEE	B827EB0000853FF6		2	✘		
<input type="checkbox"/>	↑	2025-07-30 12:11:35	Generic Handler	EEEEEEEE	B827EB0000853FF6	-111 2.2	1	✘	1	747C32332E387C687C35352E30

Fonte: Autor.

O teste de comunicação com o módulo SX1276 foi bem-sucedido. O módulo foi capaz de se autenticar e se conectar ao *gateway* LoRaWAN, além de realizar a transmissão de dados, com esses dados sendo recebidos e monitorados corretamente pelo Network Server. A comunicação entre os dispositivos e a rede foi validada, confirmando a operação do sistema LoRaWAN como esperado.

4.6 Integração dos Componentes, Lógica do Sistema e Eficiência Energética

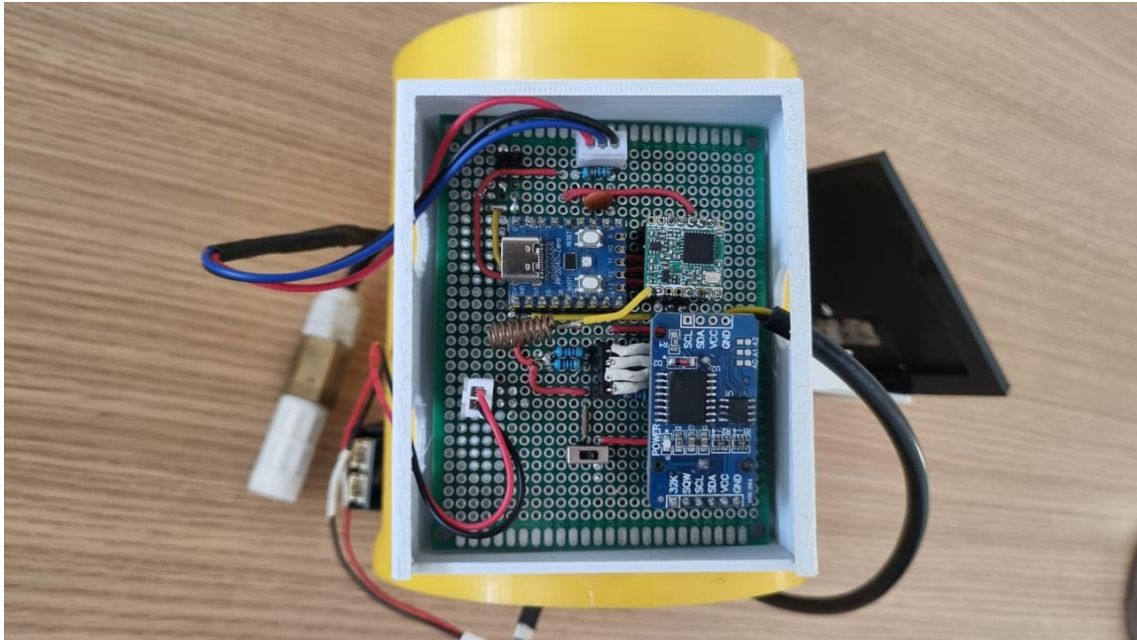
Concluídos os testes unitários, a próxima fase é a integração de todos os componentes em uma protoboard para validação do circuito final. Esse processo permitiu identificar possíveis interferências entre sensores e módulos. Ademais, foi realizada a medição do consumo de corrente do sistema completo, garantindo eficiência energética e conformidade com os requisitos

do projeto. Essa etapa valida a base técnica necessária para o avanço às próximas fases.

4.6.1 Integração dos Componentes

A Figura 45 apresenta o resultado do sistema embarcado com todos os componentes integrados após a realização dos testes unitários.

Figura 45 – Montagem completa do Sistema Embarcado.



Fonte: Autor.

4.6.2 Codificação e a Lógica Implementada do Sistema

O pseudocódigo a seguir descreve a sequência de operações implementadas no sistema embarcado, que gerencia a coleta de dados dos sensores e o envio para a rede LoRaWAN enquanto mantém o sistema em baixo consumo.

01. Se o sistema estiver ligado:
02. Inicializar rádio LoRa, sensores e RTC
03. Configurar GPIO para interrupção de wake-up
04. Agendar alarme para próxima coleta de dados
05. Enquanto o sistema estiver ativo:
06. Entrar em modo de baixo consumo (deep sleep)
07. Quando interrupção de alarme ocorrer:
08. Restaurar estado dos periféricos

09. Coletar dados dos sensores de temperatura, umidade e pluviômetro
10. Se dados válidos:
 11. Empacotar dados e preparar mensagem
 12. Enviar dados via LoRaWAN para o Gateway
 13. Atualizar contador de pacotes de uplink
 14. Reagendar alarme para próxima coleta
15. Fim Se
16. Retornar ao modo de baixo consumo
17. Fim Se

4.6.3 Consumo energético do sistema integrado

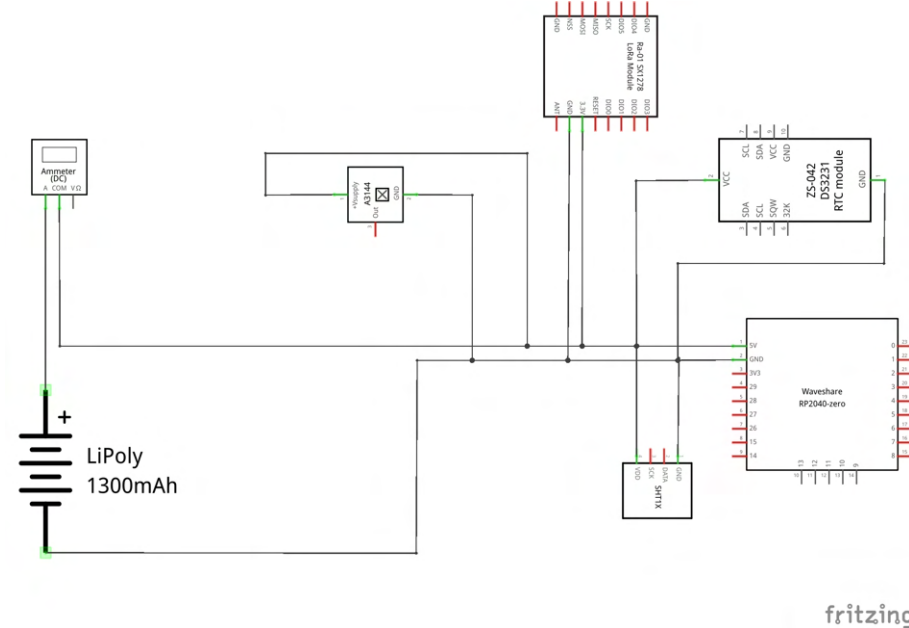
Como parte da validação do sistema, foi realizado um estudo detalhado sobre o consumo energético do sistema completo. Os testes ocorreram em laboratório, utilizando uma fonte de bancada e um multímetro para medir a corrente consumida. A fonte foi configurada para fornecer uma tensão de 3,7 V, representando a tensão típica de uma bateria de polímero de lítio, e a corrente foi limitada em 180 mA, de forma a garantir o funcionamento correto do circuito. O multímetro foi configurado para medir corrente contínua, com a escala ajustada para 200 mA.

Com o ambiente de teste configurado, o sistema embarcado foi alimentado pela fonte de bancada com o multímetro em série, permitindo mensurar o consumo de corrente em duas fases de operação: modo ativo, quando o sistema está coletando e transmitindo dados, e modo *Deep Sleep*, quando o sistema entra em estado de baixo consumo.

Para uma análise mais aprofundada do consumo energético, foi utilizado um nó sensor externo baseado no sensor INA219, o qual permite medir com alta precisão tanto a corrente quanto a tensão no sistema. O INA219 foi conectado ao sistema por meio de uma placa auxiliar dedicada, possibilitando o monitoramento contínuo da tensão e da corrente nos modos ativo e *Deep Sleep*.

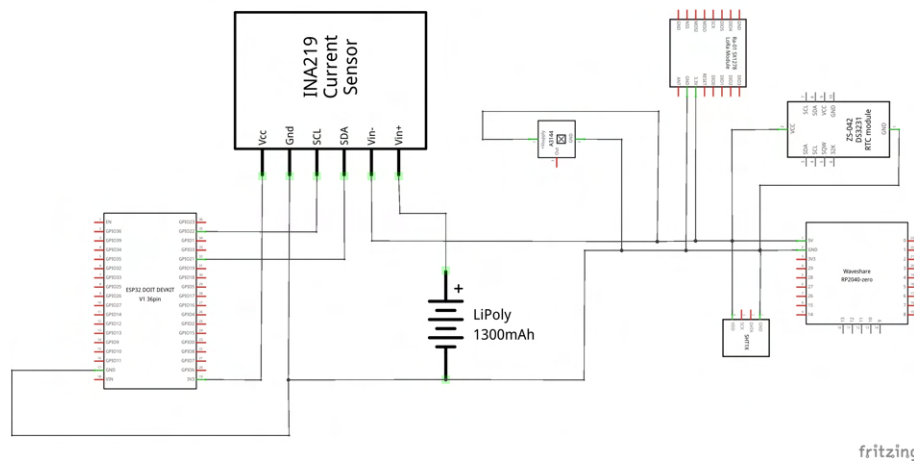
Nas Figuras 46 e 47 são apresentados os esquemas de ligação utilizados nos testes de consumo energético: inicialmente com multímetro em série e, em seguida, com o sensor INA219 integrado ao sistema embarcado. Os esquemas foram elaborados na plataforma Fritzing, incluindo apenas as conexões de alimentação e medição de corrente, tendo as ligações de dados entre os módulos sido omitidas para simplificar o diagrama. Os resultados quantitativos dessas medições são apresentados na Seção 5.

Figura 46 – Esquema de ligação utilizado para os testes de consumo energético empregando multímetro em série.



Fonte: Autor.

Figura 47 – Esquema de ligação utilizado para os testes de consumo energético empregando o sensor INA219.



Fonte: Autor.

Esses testes adicionais com o INA219 proporcionam uma visão mais detalhada sobre o comportamento energético do sistema, reforçando a importância da eficiência no consumo de energia para o sucesso do projeto.

4.7 Construção e Validação do Protótipo Funcional

Com a integração dos sensores e módulos concluída, iniciou-se a construção do protótipo funcional. Essa etapa assegura que o ecossistema esteja preparado para as condições reais e pronto para a realização dos experimentos de campo.

Devido à ausência de precipitação natural no período de testes (condições de seca), foi desenvolvido um método de simulação de chuva artificial utilizando um sistema de gotejamento controlado. O objetivo foi realizar uma calibração dinâmica, comparando a resposta do protótipo digital com um pluviômetro analógico tradicional sob as mesmas intensidades pluviométricas teóricas.

4.7.1 Cálculo da Área de Coleta

O primeiro passo do experimento foi calcular as áreas de captação de ambos os pluviômetros, pois a relação entre a área de coleta e o volume de água define a intensidade da chuva. As áreas foram calculadas utilizando as dimensões físicas de cada dispositivo.

Pluviômetro Analógico

O pluviômetro analógico utilizado como referência possui uma geometria composta.

As áreas (S_{analog}) foram calculadas da seguinte forma:

- Área do retângulo: $2.7\text{ cm} \times 4\text{ cm} = 10.8\text{ cm}^2$
- Área do meio círculo: $\pi(1.5\text{ cm})^2 \approx 3.5\text{ cm}^2$
- Área total: $S_{analog} = 10.8\text{ cm}^2 + 3.5\text{ cm}^2 = 14.3\text{ cm}^2$

A Figura 48 ilustra o pluviômetro utilizado como referência.

Figura 48 – Pluviômetro analógico utilizado como referência.



Fonte: Autor.

Protótipo do Pluviômetro Digital

O pluviômetro digital possui um funil de captação circular com raio de 5.5 cm. A área ($S_{digital}$) foi calculada como:

$$- \text{Área do funil: } S_{digital} = \pi(5.5 \text{ cm})^2 \approx 95.03 \text{ cm}^2$$

Observa-se que o pluviômetro digital apresenta uma área de captação significativamente maior (aproximadamente 6,6 vezes maior) que o analógico. Isso implica que, para simular a mesma intensidade de chuva (mm/h), o volume de água inserido no digital deve ser proporcionalmente maior.

4.7.2 Procedimento Experimental de Simulação de Chuva

Para validar a exatidão do sistema, foi montado um aparato experimental capaz de fornecer um fluxo de água constante e conhecido, simulando diferentes intensidades de precipitação.

Instrumentação e Montagem

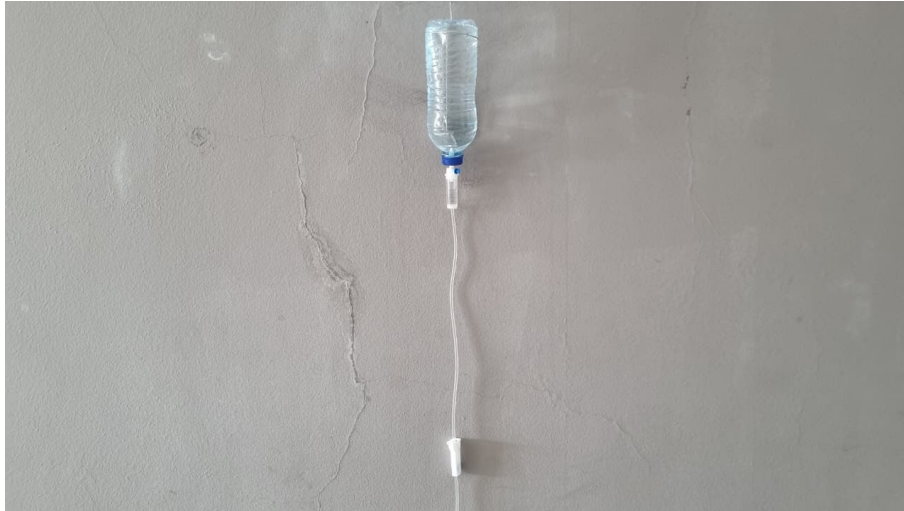
O sistema de simulação utilizou um reservatório de água (garrafa de 500 ml) acoplado a um equipo de infusão de macrogotas, padronizado conforme normas técnicas (ISO 8536-4), onde:

$$1 \text{ mL} = 20 \text{ gotas}$$

A garrafa foi posicionada invertida, com o filtro de ar lateral do equipo mantido aberto. Este procedimento garantiu a estabilidade da pressão atmosférica interna, assegurando uma vazão constante por gravidade independentemente da variação do nível de água no reservatório. O controle da intensidade da chuva foi realizado através do regulador de fluxo (roldana) do equipo.

As Figuras 49 e 50 ilustram, respectivamente, a montagem do sistema de gotejamento e o posicionamento sobre o protótipo durante os testes.

Figura 49 – Sistema de gotejamento (Equipo e Reservatório).



Fonte: Autor.

Figura 50 – Montagem experimental sobre o Protótipo.



Fonte: Autor.

Definição dos Parâmetros de Simulação

A simulação foi projetada para validar a resposta dos sensores em quatro cenários distintos de precipitação, cobrindo as faixas de chuva leve, moderada e forte. A conversão da intensidade de chuva desejada (I , em mm/h) para a taxa de gotejamento (R , em gotas/min) foi calculada para cada pluviômetro baseada na sua área de coleta (S), utilizando a equação derivada do princípio da OMM:

$$R_{\text{gotas/min}} \approx \frac{I \cdot S}{30} \quad (4.4)$$

Para o experimento, foram definidos os parâmetros de ajuste apresentados no Quadro

4. O tempo de duração para cada ensaio foi fixado em 30 minutos. Este intervalo de tempo foi selecionado em conformidade com as recomendações do Anexo 6.B do manual da OMM, que sugere a coleta de dados por um período de 25 a 30 minutos, na qual seria uma amostra por minuto, para garantir a estabilidade estatística da vazão de referência e minimizar erros de amostragem (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO), 2018).

Quadro 4 – Parâmetros de Ajuste do Gotejamento para Simulação (Duração: 30 min)

Cenário (Classificação)	Intensidade Alvo (mm/h)	Ajuste Analógico (gotas/min)	Ajuste Digital (gotas/min)
Chuva Leve	10	5	32
Chuva Moderada	20	10	63
Chuva Moderada/Forte	30	15	95
Chuva Forte	40	20	127

Fonte: Autor.

Execução e Calibração do Fluxo

O experimento seguiu um protocolo rigoroso de calibração e execução. Para assegurar a confiabilidade dos dados, cada intensidade descrita no Quadro 4 foi testada em cinco repetições, totalizando 20 ensaios para o protótipo digital.

O procedimento experimental foi estruturado nas seguintes etapas:

- 1. Preparo do Sistema (Escorva):** Antes de cada série de ensaios, realizou-se a escorva do sistema de gotejamento, promovendo a expulsão de bolhas de ar da linha e assegurando a continuidade hidráulica entre o reservatório, a câmara de gotejamento e o dispositivo de captação.
- 2. Calibração da Vazão:** O fluxo do equipo foi ajustado por meio da cronometragem do intervalo entre gotas. O refinamento da calibração foi realizado pela contagem acumulada de gotas em janelas de tempo predefinidas (por exemplo, 15 ou 30 segundos), até que a taxa de gotejamento coincidissem com o valor alvo calculado.
- 3. Simulação Controlada:** Uma vez calibrada a vazão, o gotejamento foi mantido sobre o funil de captação por um período cronometrado de 30 minutos. Durante o teste, a taxa de gotejamento foi monitorada visualmente a cada 5 minutos e corrigida através da roldana para compensar pequenas perdas de carga hidráulica causadas pela diminuição do nível de água no reservatório.
- 4. Coleta e Tratamento dos Dados:**

- No pluviômetro analógico, a precipitação acumulada foi lida diretamente na escala graduada ao final do período, observando-se o menisco da água para validação da vazão de entrada.
- No pluviômetro digital proposto, o microcontrolador registrou o número total de basculamentos (tombos) ao final de cada ciclo, convertendo-os para mm através da constante de calibração.

Os resultados obtidos, incluindo a análise de média e variação entre as repetições, são detalhados no Capítulo 5.

4.8 Planejamento e Execução de Experimentos de Campo

Conforme a metodologia (Figura 26), após a validação do protótipo em bancada, iniciou-se a fase de experimentos em ambiente real. Esta etapa foi crucial para avaliar o desempenho do sistema em condições operacionais e coletar dados para validação.

Esta seção detalha a metodologia de campo, apresentando primeiro a arquitetura de *back-end* utilizada, seguida pelo planejamento de localização, o procedimento de instalação dos nós e, por fim, as métricas de avaliação definidas.

4.8.1 Arquitetura de Coleta e Análise de Dados

A infraestrutura de *back-end* para a coleta e análise dos dados foi composta por um *gateway* LoRaWAN e uma plataforma de servidores hospedada localmente.

Para completar o enlace de comunicação, foi utilizado um *gateway* LoRaWAN baseado em um Raspberry Pi 3 (Figura 51). Este dispositivo foi configurado utilizando uma imagem ISO da fabricante RadioEnge (RADIOENGE, 2025), que habilita o Raspberry Pi 3 para operar como um *gateway* completo, executando diretamente o Servidor LoRaWAN (*LoRaWAN Server*). O *gateway* foi instalado no 1º andar do Bloco da Administração, na sala do NTIC, uma localização estratégica que garante a infraestrutura de rede e uma cobertura de sinal eficiente para a área externa do campus.

Uma vez recebidos pelo Servidor LoRaWAN (em execução no *gateway*), os pacotes de dados são encaminhados para a plataforma de análise. Esta plataforma foi implantada em um servidor dedicado, também na infraestrutura local do Campus da UFC em Quixadá. A decisão de manter todo o *back-end* localmente proporcionou maior controle, segurança e facilidade de

Figura 51 – Gateway LoRaWAN (baseado em Raspberry Pi 3 e módulo RadioEnge) instalado na sala do NTIC.



Fonte: Autor.

manutenção.

A plataforma de análise (Figura 52) foi orquestrada utilizando containers Docker, e é composta pelos seguintes componentes:

- **FIWARE (Orion Context Broker):** Utilizado para organizar e processar os dados contextuais.
- **Broker MQTT (Mosquitto):** Integrado para otimizar a troca de mensagens entre o Servidor LoRaWAN e o FIWARE.
- **Grafana:** Utilizado para a visualização dos dados em tempo real.

O servidor FIWARE ficou, então, responsável por armazenar, processar e disponibilizar os dados coletados para visualização e análise.

4.8.2 Planejamento e Localização dos Testes

O planejamento dos testes foi realizado em conjunto com o orientador, definindo-se os locais estratégicos para instalação do dispositivo (nó sensor). Foram considerados fatores como a disponibilidade de cobertura da rede LoRaWAN, facilidade de acesso, segurança e a proximidade com a estação meteorológica profissional da UFC, utilizada como referência.

Contudo, foi observado que a localização exata da estação profissional poderia sofrer interferências (ex: atividades de manutenção e irrigação do gramado). Visando mitigar estas

Figura 52 – Exibição dos containers Docker (FIWARE, Grafana, Mosquitto) no servidor de aplicação.

```
smart@smartufcqx:~$ docker ps
```

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS	PORTS
1f383c39e58a	smartufc-dev-config	"python3 app.py"	3 weeks ago	Up 3 weeks	0.0.0.0:5000
2->50002/tcp, :::50002->50002/tcp					smartufc-dev-conf
3ae4ba3b507b	quay.io/fiware/iotagent-ul:3.1.0-distroless	"/nodejs/bin/node ./..."	3 weeks ago	Up 3 weeks (healthy)	4061/tcp, 0.0.0.0:4041->4041/tcp, :::4041->4041/tcp, 7896/tcp
6aaac4c2d7b8	orchestracities/quantumleap:1.0.0	"python app.py"	3 weeks ago	Up 3 weeks (healthy)	0.0.0.0:8668
->8668/tcp, :::8668->8668/tcp					fiware-quantumlea
3fd853bbb5e1	quay.io/fiware/orion:3.11.0	"/usr/bin/contextBro..."	3 weeks ago	Up 3 weeks (healthy)	0.0.0.0:1026
->1026/tcp, :::1026->1026/tcp					fiware-orion
f18e750a9952	prom/prometheus:latest	"/bin/prometheus --c..."	3 weeks ago	Up 3 weeks	0.0.0.0:9090
->9090/tcp, :::9090->9090/tcp					prometheus
02f7879bb07b	grafana/grafana:9.4.7	"/run.sh"	3 weeks ago	Up 3 weeks	0.0.0.0:3000
->3000/tcp, :::3000->3000/tcp					grafana
d38ea42fd449	ghcr.io/justwatchcom/sql_exporter	"/bin/sh -c sql_expo..."	3 weeks ago	Up 3 weeks	9237/tcp
					sql-exporter
557550a524ba	mongo:4.4	"docker-entrypoint.s..."	3 weeks ago	Up 3 weeks (healthy)	0.0.0.0:2701
7->27017/tcp, :::27017->27017/tcp					db-mongo
30631d5187f	redis:6	"docker-entrypoint.s..."	3 weeks ago	Up 3 weeks (healthy)	0.0.0.0:6379
->6379/tcp, :::6379->6379/tcp					db-redis
39932c6785ab	crate:4.8.4	"/docker-entrypoint..."	3 weeks ago	Up 3 weeks	0.0.0.0:4200
->4200/tcp, :::4200->4200/tcp, 0.0.0.0:4300->4300/tcp, :::4300->4300/tcp, 0.0.0.0:5432->5432/tcp, :::5432->5432/tcp					db-crate
fa8219a77674	gcr.io/cadvisor/cadvisor:latest	"/usr/bin/cadvisor -..."	3 weeks ago	Up 3 weeks (healthy)	8080/tcp
					cadvisor
0834c935183c	eclipse-mosquitto:1.6.14	"/docker-entrypoint..."	3 weeks ago	Up 3 weeks	0.0.0.0:9001
->9001/tcp, :::9001->9001/tcp, 50001/tcp, 0.0.0.0:50001->1883/tcp, :::50001->1883/tcp					mosquitto
e2089774bdd5	prom/node-exporter:latest	"/bin/node_exporter ..."	3 weeks ago	Up 3 weeks	9100/tcp
					nodeexporter

Fonte: Autor.

variáveis, optou-se por instalar o protótipo em diferentes pontos de teste em áreas abertas, conforme ilustrado nas Figuras 53 e 54.

Figura 53 – Pontos de teste 1 (50,80 m) e 2 (37,91 m) no campus da UFC Quixadá.



Fonte: Autor (adaptado de Google Maps).

Figura 54 – Pontos de teste 3 (291,25 m) e 4 (122,03 m) no entorno do campus.



Fonte: Autor (adaptado de Google Maps).

4.8.3 Procedimento de Instalação do Protótipo

Para a instalação em campo, não havia uma estrutura física normalizada. Foi utilizada uma base de madeira (estaca) fixada ao solo para servir de suporte ao protótipo.

Um critério crítico para a correta medição pluviométrica é o nivelamento do pluviômetro de báscula. Um desequilíbrio na instalação pode levar a medições incorretas. Para assegurar a instalação correta, o nivelamento foi realizado com o auxílio do sensor de inclinação de um telefone celular, garantindo que o dispositivo estivesse perfeitamente nivelado (0° de inclinação), conforme detalhado na Figura 55.

Figura 55 – Critério de instalação: (a) Suporte de madeira e (b) Verificação de nivelamento (0°).



Fonte: Autor.

4.8.4 Execução e Validação do Fluxo de Dados

Durante os experimentos em campo, foi realizado a avaliação do sistema implantado, na qual foi planejada com o objetivo de analisar o desempenho da comunicação entre o dispositivo final e o servidor LoRaWAN, utilizando métricas chave como SNR, RSSI e Taxa de Sucesso. O cenário de teste foi configurado para que o dispositivo final enviase 18 pacotes por SF, abrangendo os fatores de espalhamento SF7, SF9 e SF12, em um intervalo definido em 30 minutos. Os resultados desses testes de campo são apresentados no Capítulo 5.

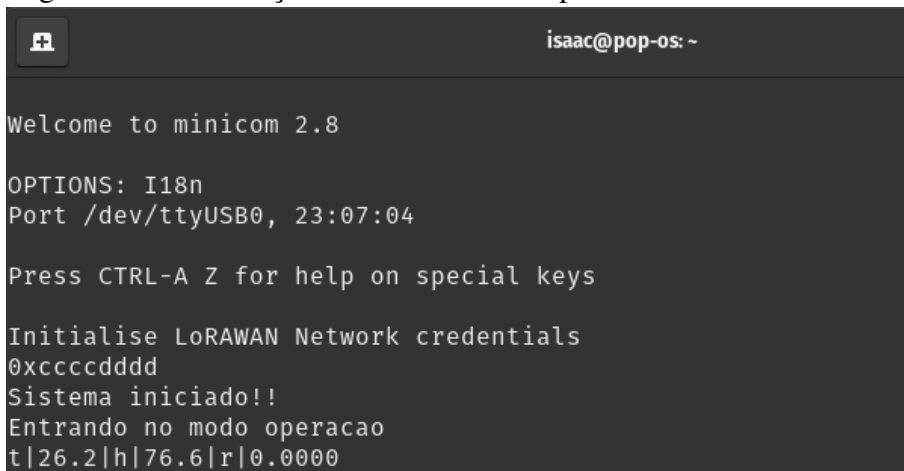
Após a instalação, foi realizado um teste de validação do fluxo de dados *end-to-end*, desde o nó sensor até a plataforma de visualização. O objetivo foi garantir que os dados coletados pelo protótipo fossem corretamente transmitidos, processados e exibidos no *dashboard*.

O processo de validação seguiu três etapas:

1. **Verificação da Transmissão (Protótipo):** O dispositivo foi configurado para transmitir pacotes de dados a cada 30 minutos. A verificação inicial foi feita monitorando a saída do terminal serial do dispositivo, confirmando que os pacotes estavam sendo enviados (conforme Figura 56).

2. **Verificação da Recepção (Servidor LoRaWAN):** Em seguida, foi verificado o *dashboard* do Servidor LoRaWAN. Conforme os pacotes eram enviados pelo nó, as notificações de recepção (Figura 57) confirmavam que o *gateway* estava recebendo os dados e encaminhando-os corretamente.
3. **Verificação da Visualização (Grafana):** Finalmente, os dados processados e encaminhados pelo FIWARE foram visualizados na plataforma Grafana. O *dashboard* (Figura 58) exibiu os dados de temperatura, umidade e precipitação, permitindo a análise em tempo real e validando o funcionamento completo do sistema.

Figura 56 – Verificação da transmissão de pacotes via terminal serial.



```

isaac@pop-os: ~
Welcome to minicom 2.8

OPTIONS: I18n
Port /dev/ttyUSB0, 23:07:04

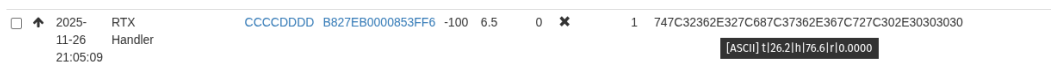
Press CTRL-A Z for help on special keys

Initialise LoRAWAN Network credentials
0xccccddd
Sistema iniciado!!
Entrando no modo operacao
t|26.2|h|76.6|r|0.0000

```

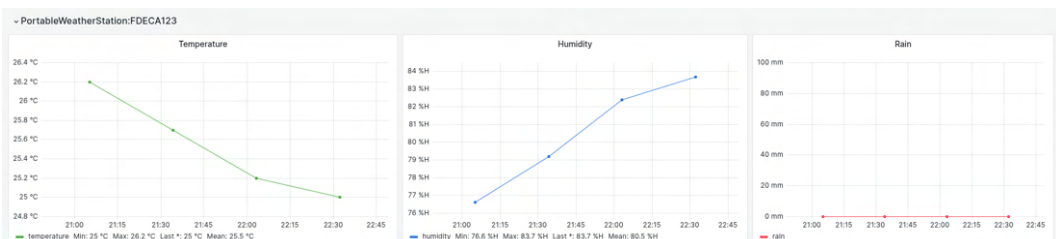
Fonte: Autor.

Figura 57 – Notificação de recebimento de pacotes no dashboard do Servidor LoRaWAN.



Fonte: Autor.

Figura 58 – Visualização dos dados de telemetria em tempo real na plataforma Grafana.



Fonte: Autor.

4.8.5 Métricas de Avaliação

A execução dos testes nestes locais permitiu a coleta de dados para a análise de desempenho, que será apresentada em detalhes no Capítulo 5. A avaliação foi planejada com dois objetivos principais:

1. **Validação dos Dados Pluviométricos:** Comparação dos dados de chuva coletados pelo protótipo com os dados da estação meteorológica profissional de referência.
2. **Análise do Desempenho da Comunicação:** Avaliação da qualidade do enlace LoRaWAN. Para este fim, o cenário de teste foi configurado para que o dispositivo final enviasse 18 a 30 pacotes por (SF), abrangendo os SF7, SF9 e SF12.

As métricas detalhadas coletadas para esta análise de desempenho foram:

- **Dados Pluviométricos (mm):** Medição de precipitação para comparação com a estação de referência.
- **SNR (dB):** A relação sinal-ruído, indicador fundamental da qualidade do enlace.
- **RSSI (dBm):** A intensidade do sinal recebido, que avalia a força do enlace de comunicação.
- **Taxa de Sucesso de Envio de Pacote:** A porcentagem de pacotes transmitidos com sucesso, para avaliar a eficácia da comunicação em cada SF.

5 RESULTADOS

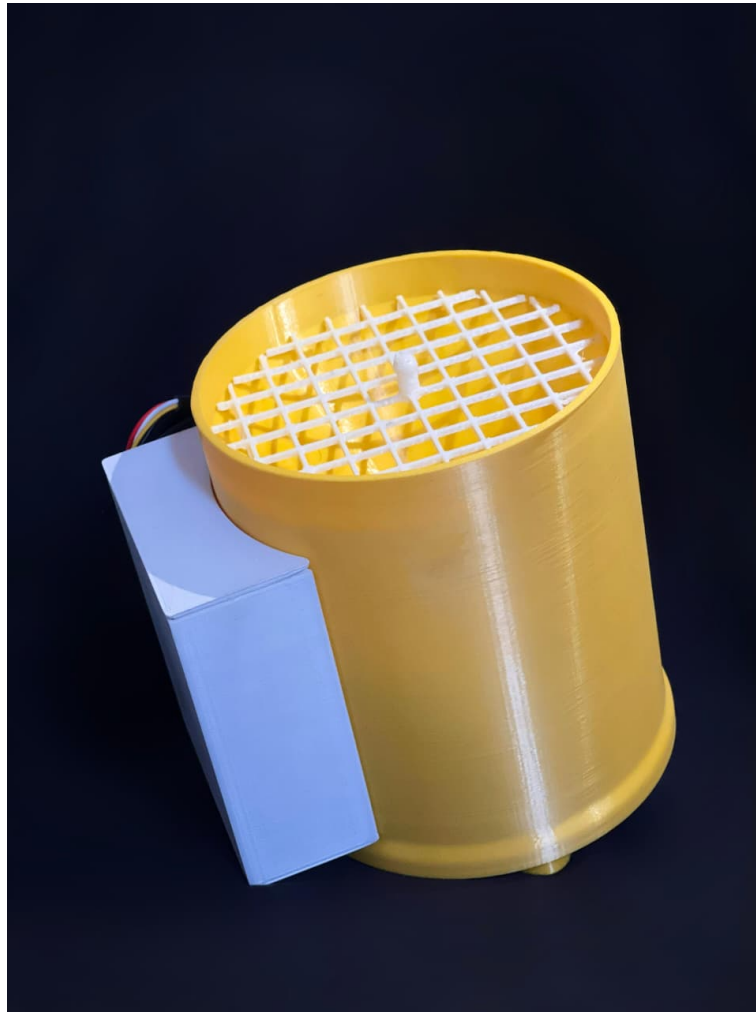
Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos com a consolidação do protótipo da estação meteorológica portátil. A discussão inicia-se com a apresentação da estrutura física finalizada, detalhando o design 3D e a integração dos componentes mecânicos e eletrônicos. Em seguida, são abordados os dados referentes ao consumo energético do sistema, validando a autonomia do dispositivo em campo. Por fim, demonstra-se a eficácia da automatização na coleta e transmissão de dados meteorológicos por meio do protocolo LoRaWAN, consolidando o ciclo de funcionamento da solução proposta.

5.1 Desenvolvimento e Montagem da Estrutura Física (Modelo 3D)

A materialização do projeto resultou em uma estação meteorológica compacta e modular, fabricada por meio de impressão 3D. O design foi concebido para garantir a portabilidade e a proteção dos componentes eletrônicos contra intempéries, ao mesmo tempo em que assegura a precisão mecânica necessária para a medição pluviométrica.

A Figura 59 apresenta a visão externa do protótipo finalizado. A estrutura cilíndrica principal atua como o corpo do pluviômetro, projetada com uma área de captação específica para direcionar a água da chuva ao mecanismo interno, além de integrar o sensor de temperatura e umidade externo. No topo, destaca-se a implementação de uma tela de proteção, essencial para impedir que folhas ou sedimentos obstruam o funil de entrada.

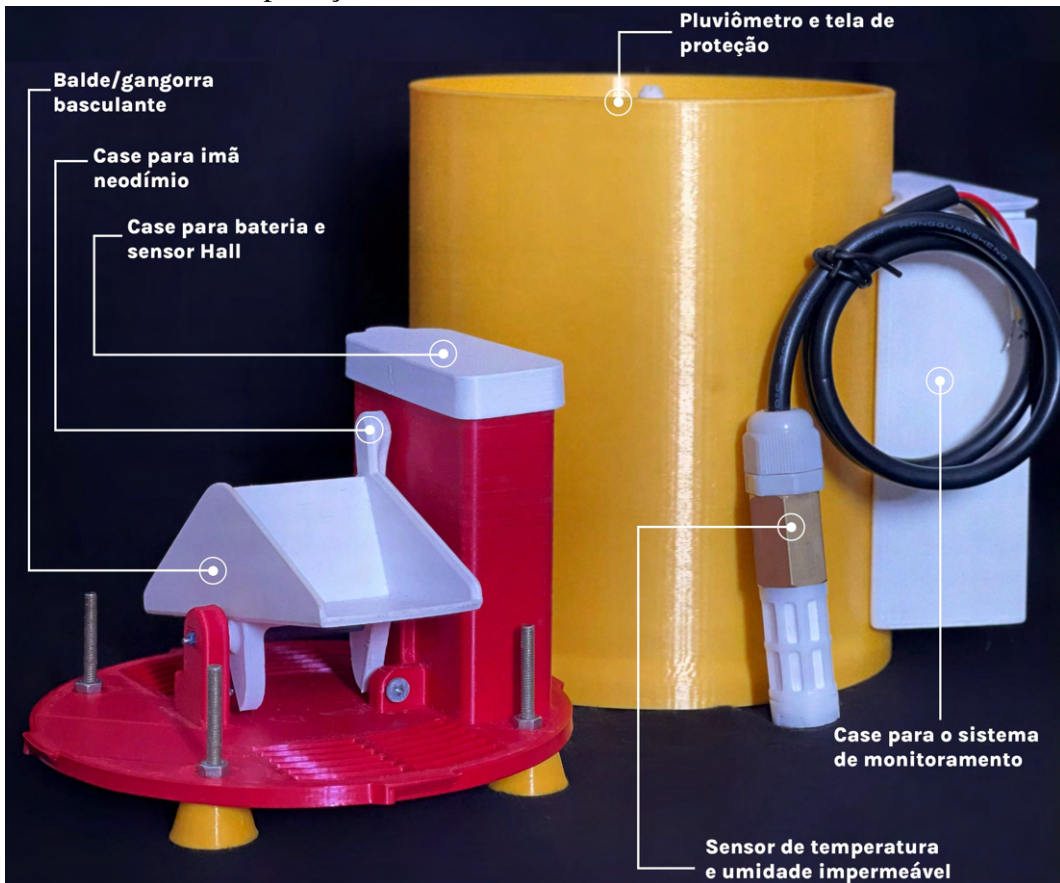
Figura 59 – Visão externa da estação portátil montada com destaque para o filtro de detritos.



Fonte: Autor.

Internamente, o sistema utiliza o mecanismo de *tipping-bucket*, conforme detalhado na Figura 60. O conjunto mecânico é composto por uma base ajustável com parafusos niveladores, fundamentais para garantir que a estação esteja nivelada durante a operação, evitando enviesamento nos dados de precipitação.

Figura 60 – Visão detalhada dos componentes internos: mecanismo basculante, sensores e cases de proteção.



Fonte: Autor.

A gangorra basculante possui um alojamento para um ímã de neodímio. A cada volume de água calibrado que preenche um dos lados da báscula, ocorre o movimento de basculamento, permitindo que o sensor Hall detecte a variação do campo magnético e contabilize a precipitação.

Além do mecanismo pluviométrico, a Figura 60 evidencia um *case* dedicado projetado para abrigar internamente o sensor Hall e a bateria do sistema, isolando a eletrônica da umidade direta.

Após a integração dos componentes, procedeu-se à instalação do sistema em ambiente real para a realização dos testes de validação. As Figuras 61 e 62 apresentam o protótipo fixado em uma base de madeira nivelada, respeitando os critérios de exposição e estabilidade definidos na Seção 4.8.3.

Figura 61 – Instalação do protótipo em campo para validação experimental.



Fonte: Autor.

Figura 62 – Instalação do protótipo em campo para validação experimental.

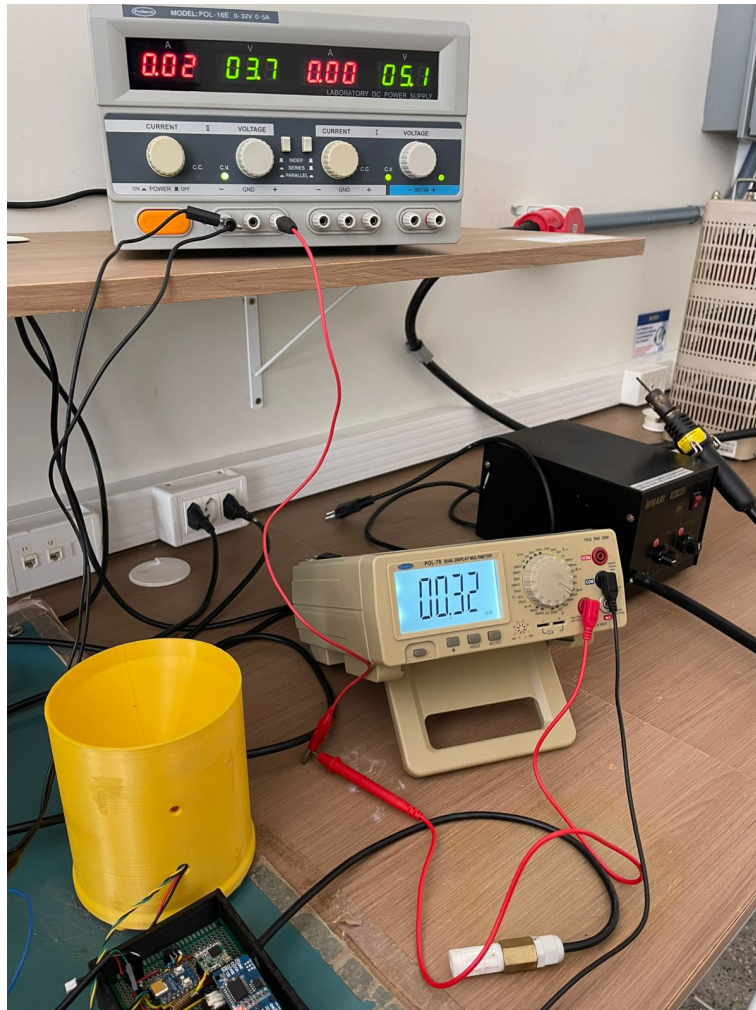


Fonte: Autor.

5.2 Análise do Consumo Energético

Para a caracterização do consumo energético do dispositivo proposto neste trabalho foi realizada em duas etapas. Inicialmente, tentou-se uma medição de bancada utilizando um multímetro digital em série para aferir os principais estados de operação, conforme ilustrado nas Figuras 63 e 64.

Figura 63 – Medição de corrente em modo ativo com multímetro digital.



Fonte: Autor.

Figura 64 – Medição de corrente em modo *Deep Sleep* com multímetro digital.



Fonte: Autor.

A Figura 63 registra o consumo em modo ativo (aprox. 32 mA), enquanto a Figura 64 mostra o modo *Deep Sleep* (aprox. 0,07 mA). Contudo, este método se mostrou inadequado para uma caracterização precisa por duas razões principais:

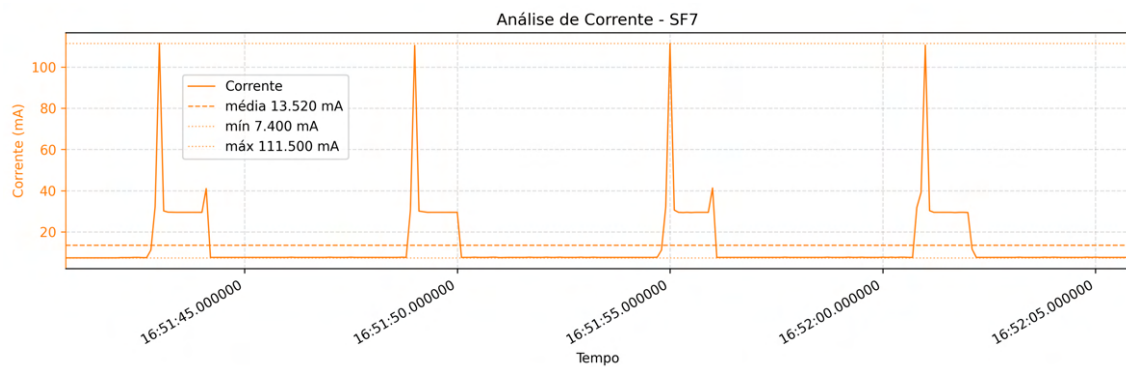
1. **Eventos Transitórios:** A transmissão LoRa é um evento pulsado. A baixa taxa de atualização do multímetro não permite capturar o pico real de corrente nem a duração exata da transmissão.
2. **Imprecisão em Baixo Consumo:** A medição estática em *Sleep* (0,07 mA) não reflete o consumo dinâmico real do sistema, que pode incluir breves picos de atividade do processador.

Para superar essas limitações, foi empregado o método de medição baseado no sensor INA219, que monitora corrente e tensão com alta frequência de amostragem, conforme descrito na Seção 4.6.3. Para viabilizar a coleta de dados, os testes foram conduzidos com um intervalo de transmissão reduzido e configurando o dispositivo para transmitir sucessivamente com diferentes Fatores de Espalhamento: SF7, SF9 e SF12 em ambiente de laboratório.

5.2.1 Perfil de Consumo: SF7 (Linha de Base)

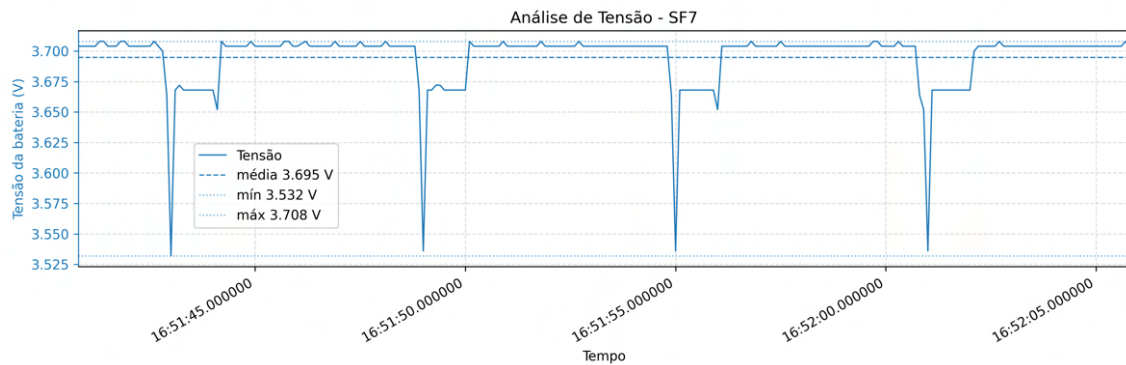
As Figuras 65 e 66 detalham o comportamento do sistema operando em SF7.

Figura 65 – Perfil de corrente dinâmico medido com o sensor INA219 (SF7).



Fonte: Autor.

Figura 66 – Perfil de tensão da bateria medido com o sensor INA219 (SF7).



Fonte: Autor.

A análise do SF7 revela um comportamento cíclico claro, dominado por dois estados distintos: os períodos de baixo consumo e os picos de transmissão. Os dados estatísticos extraídos desta medição, que servem de base para a análise, são

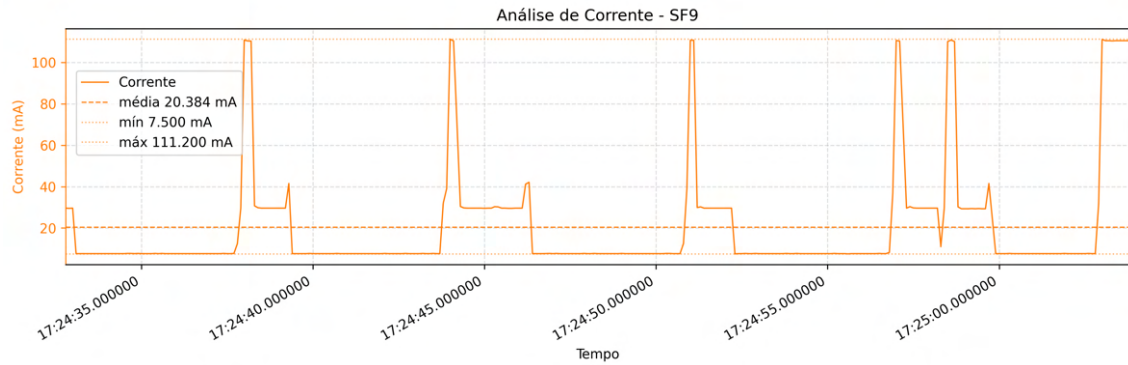
- **Pico Máximo:** 111,5 mA (Transmissão do Rádio).
- **Consumo Mínimo:** 7,40 mA (*Deep Sleep*).
- **Corrente Média do Teste:** 13,52 mA.

Nota-se a discrepância entre a medição estática do multímetro (0,07 mA) e o mínimo real do INA219 (7,40 mA), validando a escolha de um método de medição de maior resolução temporal. Além disso, a Figura 66 apresenta a resposta da tensão da bateria (LiPo) aos picos de corrente. Observa-se uma correlação direta entre os dois gráficos: no exato momento em que o sistema drena o pico de 111,5 mA, a tensão da bateria sofre uma queda momentânea (*voltage sag*), atingindo um valor mínimo de 3,532 V (partindo de uma tensão de repouso de 3,7 V). Este fenômeno é esperado e é causado pela resistência interna da bateria.

5.2.2 Impacto do Fator de Espalhamento (SF9 e SF12)

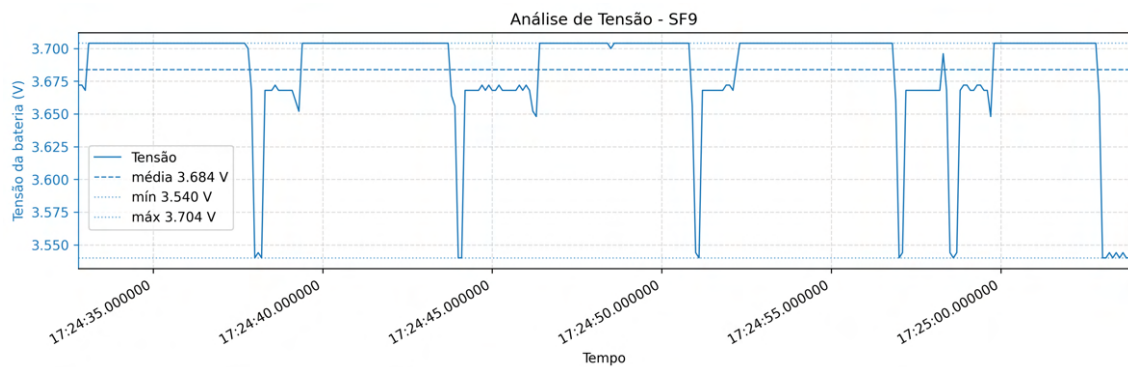
Para avaliar o custo energético associado ao aumento do alcance e maior robustez de transmissão, o mesmo teste foi repetido para SF9 e SF12. As Figuras 67 a 70 apresentam os perfis obtidos.

Figura 67 – Perfil de corrente dinâmico medido com o sensor INA219 (SF9).



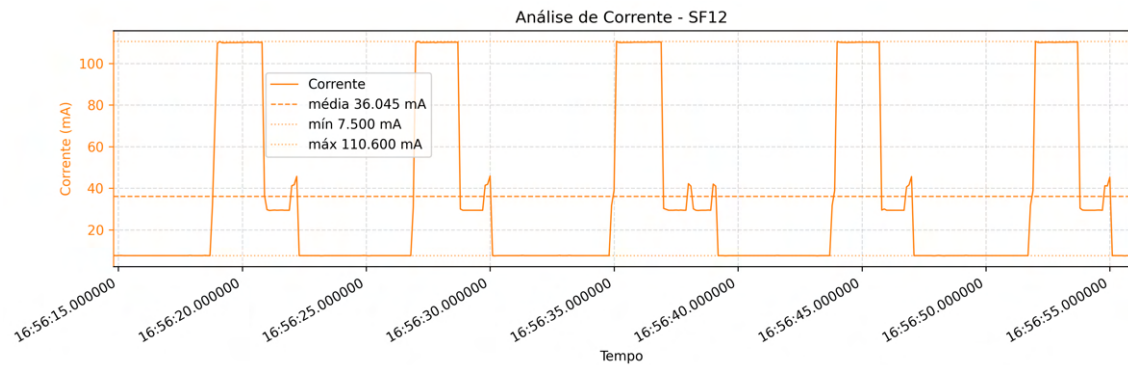
Fonte: Autor.

Figura 68 – Perfil de tensão da bateria medido com o sensor INA219 (SF9).



Fonte: Autor.

Figura 69 – Perfil de corrente dinâmico medido com o sensor INA219 (SF12).

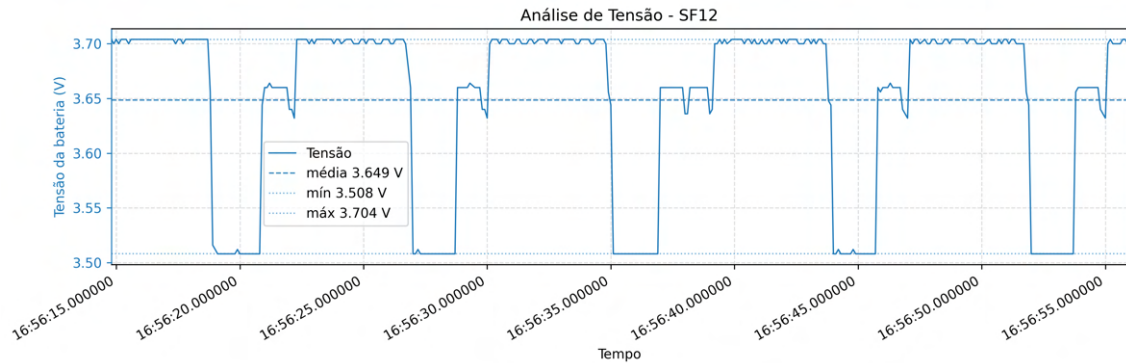


Fonte: Autor.

A comparação visual entre os gráficos de corrente (Figuras 65, 67 e 69) evidencia o impacto do tempo aéreo (*Time on Air*). Embora a amplitude do pico de corrente seja praticamente a mesma (aproximadamente 111 mA) em todos os casos, visto que a potência de transmissão do rádio é constante, a largura do pulso aumenta significativamente no SF12.

A Tabela 2 sintetiza os dados coletados nos três cenários de teste em laboratório (com transmissões contínuas).

Figura 70 – Perfil de tensão da bateria medido com o sensor INA219 (SF12).



Fonte: Autor.

Tabela 2 – Comparativo de consumo energético por Fator de Espalhamento.

Métrica	SF7	SF9	SF12
Pico máx. de corrente (mA)	111.5	111.2	110.6
Corrente média do teste (mA)	13.52	20.38	36.04
Tensão mínima (V)	3.532	3.540	3.508

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, ao passar do SF7 para o SF12, a corrente média do sistema durante o teste quase triplicou (de 13,52 mA para 36,04 mA). Isso ocorre porque o rádio precisa permanecer ligado e transmitindo (consumindo aproximadamente 110 mA) por muito mais tempo para enviar a mesma quantidade de dados no SF12. Além disso, a Figura 70 mostra que a bateria é submetida ao estresse de queda de tensão por períodos mais longos.

5.2.3 Estimativa de Autonomia

Com base nos dados validados do INA219, é possível estimar a autonomia do sistema. Para o cenário de laboratório (com transmissões aceleradas utilizando SF7), a corrente média de 13,52 mA e uma bateria de 2000 mAh resultariam em uma autonomia teórica de aproximadamente 148 horas (cerca de 6,2 dias).

Para o cenário de operação em campo, onde as transmissões ocorrerão em intervalos longos (30 a 60 minutos), o dispositivo final permanecerá predominantemente em modo *Deep Sleep*. Portanto, a corrente média do sistema tenderá a se aproximar muito da corrente de repouso (7,4 mA). Utilizando este valor como base de cálculo, a autonomia teórica com a mesma bateria de 2000 mAh é estimada em cerca de 270 horas (aproximadamente 11,3 dias).

É importante notar que esses valores são estimativas teóricas, e a autonomia real pode ser influenciada por fatores como auto-descarga da bateria, temperatura ambiente e enve-

lhecimento dos componentes químicos da célula de energia.

Além disso, resalta-se que a escolha do Fator de Espalhamento impacta diretamente a energia gasta a cada ciclo de envio. O uso contínuo do SF12, embora garanta a entrega de pacotes em longas distâncias, reduz a eficiência energética global do sistema devido ao maior tempo de rádio ativo. Para maximizar a vida útil da bateria em aplicações reais, recomenda-se o uso de algoritmos de ADR (*Adaptive Data Rate*), que permitem ao dispositivo utilizar SF7 sempre que possível, comutando para SF12 apenas quando estritamente necessário para manter o enlace.

Para aplicações de monitoramento em longo prazo, essa autonomia foi estendida por meio da integração de um módulo de carregamento MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) CN3791 e de um painel solar de 12 V, responsáveis pela recarga da bateria durante o período diurno. Com esse arranjo, o sistema passa a operar em regime de colheita de energia, reduzindo a necessidade de intervenções de manutenção para substituição ou recarga manual da bateria e aumentando o potencial de operação contínua em campo.

5.3 Análise da Simulação Experimental

Os experimentos de simulação de chuva foram conduzidos conforme a metodologia descrita na Seção 4.7. O sistema foi submetido a quatro cenários distintos de intensidade pluviométrica: 10, 20, 30 e 40 mm/h, com duração de 30 minutos por ensaio.

Para o pluviômetro analógico, a leitura foi realizada diretamente na escala graduada. Para o protótipo digital, os valores foram extraídos por meio da comunicação serial, considerando a constante de calibração volumétrica de 0,5261 mm/tombo.

5.3.1 Consolidação dos Dados Experimentais

O Quadro 5 apresenta a média aritmética dos valores obtidos nas cinco rodadas de testes para o protótipo digital, comparados ao volume teórico injetado e à referência visual do pluviômetro analógico.

Quadro 5 – Média dos Resultados Experimentais (n=5 por intensidade)

Intensidade Simulada	Volume Teórico	Leitura Analógica	Protótipo Digital (Média)		
			Tombos	Medição	Erro Relativo
10 mm/h	5,00 mm	5,0 mm	9,6	5,05 mm	+1,0%
20 mm/h	10,00 mm	10,0 mm	19,6	10,31 mm	+3,1%
30 mm/h	15,00 mm	15,0 mm	29,4	15,47 mm	+3,1%
40 mm/h	20,00 mm	20,0 mm	44,4	23,36 mm	+16,8%

Fonte: Autor.

5.3.2 *Análise de Desempenho e Linearidade*

A análise detalhada dos dados permite caracterizar o comportamento dinâmico do sensor em diferentes regimes de vazão, identificando zonas de linearidade e pontos de saturação mecânica.

Regime de Alta Exatidão (10 a 30 mm/h)

Nas intensidades leve, moderada e moderada-forte, o sistema demonstrou excelente estabilidade e linearidade:

- O erro relativo manteve-se consistentemente baixo, abaixo de 3,2% em todos os testes até 30 mm/h.
- A pequena variação positiva observada (entre 1,0% e 3,1%) está dentro da margem de incerteza do método de calibração manual do gotejamento e de erros de quantização (volume residual no balde).
- O resultado de 30 mm/h (erro de +3,1%) foi particularmente relevante, pois demonstrou que o mecanismo de balança mantém sua estabilidade mecânica mesmo sob fluxos consideráveis, sem apresentar discrepâncias significativas em relação à tendência observada em 20 mm/h.

Regime Não-Linear e Transição Hidrodinâmica (Alta Intensidade)

Ao elevar a intensidade para 40 mm/h, observou-se uma ruptura no comportamento linear do sensor, com o erro saltando bruscamente para +16,8%.

Esta divergência está diretamente associada à alteração no regime de escoamento do fluido pelo funil. Durante os testes experimentais, notou-se que, ao ultrapassar a faixa de 30 mm/h (aproximadamente 95 gotas/min), o gotejamento discreto começa a se fundir, tendendo à formação de um fluxo contínuo ao atingir a intensidade de 40 mm/h.

Esse fenômeno físico altera a dinâmica de impacto sobre a balança. Conforme explicado por (Braga *et al.*, 2008), quando o escoamento passa de gotejamento para um fluxo contínuo, a força exercida pelo fluido muda. No caso específico deste protótipo, a energia cinética desse fluxo contínuo soma-se ao peso da água acumulada, vencendo a inércia e o equilíbrio mecânico do conjunto prematuramente. O resultado prático é que a balança bascula com um volume inferior à calibração estática de 5 mL, gerando uma contagem de tombos superior ao real.

5.3.3 Conclusão da Validação do Experimento

Os testes validam o protótipo como um instrumento confiável para a grande maioria dos eventos pluviométricos (leves a moderados). A identificação clara do limite de linearidade (próximo a 40 mm/h) é um resultado positivo, pois fornece os parâmetros necessários para a implementação futura de um algoritmo de correção não-linear no *firmware*, permitindo que o equipamento opere com alta exatidão também em tempestades severas.

5.4 Avaliação de Desempenho do Protótipo

A avaliação de desempenho teve como objetivo analisar a eficiência da infraestrutura IoT implantada no campus da UFC em Quixadá. As métricas de comunicação SNR, RSSI e Taxa de Sucesso de Envio de Pacotes, foram utilizadas para quantificar a qualidade do enlace LoRaWAN em diferentes condições de propagação.

5.4.1 Análise das Métricas de Comunicação por Cenário

Nesta seção, são detalhados os resultados obtidos nos quatro cenários de teste definidos na metodologia. A análise observa o comportamento das métricas em função dos Fatores de Espalhamento (SF7, SF9 e SF12).

Cenários de Curta Distância e Visada Direta (Cenários 1 e 2)

Os primeiros testes foram realizados em pontos com maior proximidade ao *gateway* ou com linha de visada favorável. A Tabela 3 apresenta os resultados para o Cenário 1 (distância de 49,69 m, conforme Figura 53), enquanto a Tabela 4 detalha o Cenário 2 (distância de 37,91 m, conforme Figura 53).

Tabela 3 – Métricas de desempenho - Cenário 1 (49,69 m).

Métrica	SF7	SF9	SF12
Média SNR (dB)	8,00	10,48	7,08
Média RSSI (dBm)	-91,27	-93,44	-90,50
Taxa de Sucesso (%)	100,0	100,0	100,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4 – Métricas de desempenho - Cenário 2 (37,91 m).

Métrica	SF7	SF9	SF12
Média SNR (dB)	8,38	10,41	7,64
Média RSSI (dBm)	-78,22	-80,94	-75,61
Taxa de Sucesso (%)	100,0	100,0	100,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se que, nestes dois cenários, a qualidade do sinal foi excelente. O RSSI manteve-se elevado (acima de -95 dBm) e o SNR positivo, indicando que o sinal recebido era significativamente mais forte que o ruído de fundo. Como consequência dessa eficácia, obteve-se 100% de taxa de entrega de pacotes em todos os SFs, demonstrando que, para curtas distâncias, o uso de SF7 é ideal por oferecer menor consumo de energia e menor tempo de uso do canal aéreo.

Cenários de Longa Distância ou Obstrução (Cenários 3 e 4)

Os testes subsequentes avaliaram o sistema em condições mais desafiadoras, com maiores distâncias ou presença de obstáculos (como edificações e vegetação).

A Tabela 5 refere-se ao Cenário 4 (distância de 122,03 m, ver Figura 54). Nota-se uma degradação natural do sinal em comparação aos cenários anteriores, com o RSSI caindo para a faixa de -108 dBm e o SNR reduzindo para cerca de 5 dB. Ainda assim, a robustez da modulação LoRa garantiu a entrega total dos pacotes.

Tabela 5 – Métricas de desempenho - Cenário 4 (122,03 m).

Métrica	SF7	SF9	SF12
Média SNR (dB)	4,20	5,91	5,01
Média RSSI (dBm)	-108,77	-109,61	-108,22
Taxa de Sucesso (%)	100,0	100,0	100,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

O caso mais crítico foi observado no Cenário 3 (distância de 291,25 m, ver Figura 54), cujos resultados são apresentados na Tabela 6. Este cenário representou o limite de operação

testado, apresentando os piores níveis de sinal

Tabela 6 – Métricas de desempenho - Cenário 3 (291,25 m).

Métrica	SF7	SF9	SF12
Média SNR (dB)	0,61	2,87	2,11
Média RSSI (dBm)	-113,79	-113,33	-112,38
Taxa de Sucesso (%)	94,44	100,0	100,0

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conclusão da Análise das Métricas

A seleção dos Fatores de Espalhamento SF7, SF9 e SF12 para este estudo teve como objetivo realizar um comparativo abrangente, cobrindo desde a configuração de maior eficiência energética e menor alcance (SF7) até a configuração mais robusta e de longo alcance (SF12), utilizando o SF9 como um parâmetro intermediário.

A análise dos dados confirma o *trade-off* inerente à tecnologia LoRa. Nos cenários de curta distância (1 e 2), todos os fatores obtiveram 100% de sucesso. Neste contexto, o uso do SF7 seria a escolha técnica ideal, pois oferece o menor consumo de energia e menor tempo de ocupação do canal.

Por outro lado, no Cenário 3 (Tabela 6), onde o sinal atingiu níveis críticos (-113 dBm), o SF7 apresentou perda de pacotes (94,44% de sucesso), evidenciando sua limitação em condições severas. Em contrapartida, a transição para SF9 e SF12 recuperou a estabilidade do link (100% de sucesso), validando a maior sensibilidade e robustez destes fatores, ainda que ao custo de um maior consumo energético.

Dessa forma, conclui-se que a configuração do dispositivo final não deve ser estática, mas sim dependente do contexto de instalação: priorizando SFs baixos para economia de bateria em locais com boa linha de visada, e reservando SFs altos (como SF12) apenas para dispositivos distantes ou obstruídos onde a eficiência de entrega supera a necessidade de economia de energia.

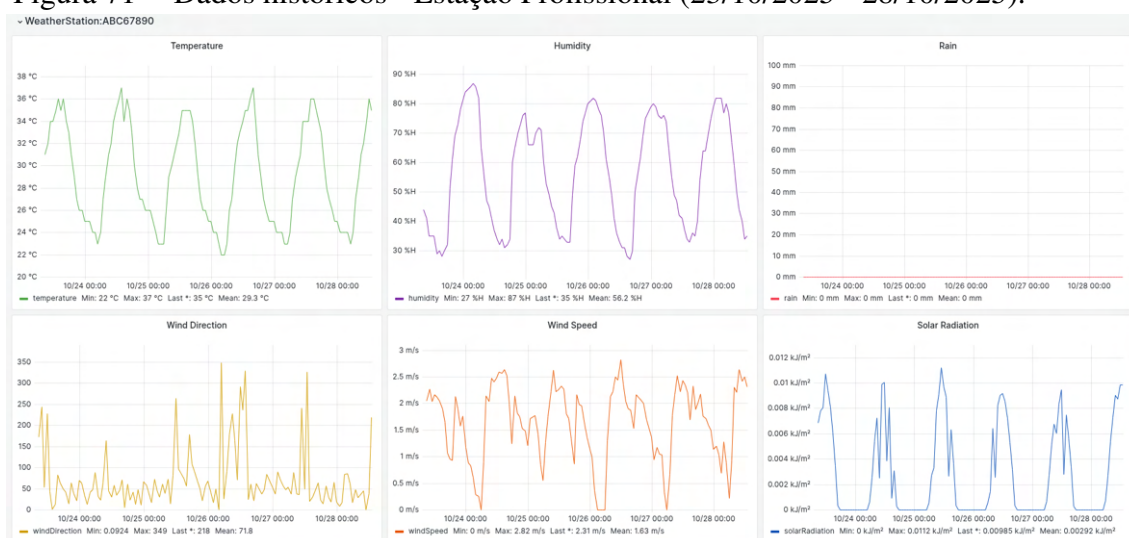
5.5 Coleta e Análise de Dados Climáticos

A visualização e análise dos dados coletados foram realizadas utilizando a plataforma Grafana, que possibilitou a telemetria em tempo real e a consulta histórica dos parâmetros climáticos. Para validar o funcionamento do protótipo desenvolvido (Estação Portátil), foi

realizado um comparativo com os dados da Estação Meteorológica Profissional instalada no campus da UFC Quixadá. Esta estação de referência opera como um dos dispositivos finais na infraestrutura do campus e fornece uma base confiável para a validação, especialmente para as variáveis de temperatura, umidade relativa e precipitação.

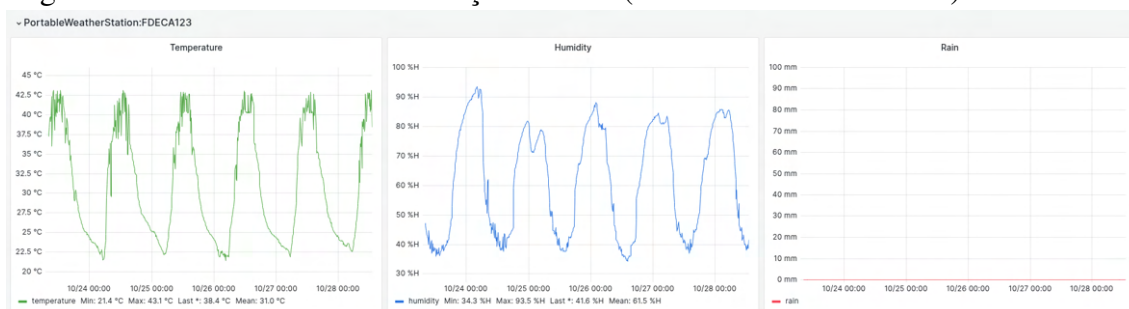
O período inicial de coleta selecionado para a visão geral compreende o intervalo entre 23 e 28 de outubro de 2025. As Figuras 71 e 72 apresentam os painéis de dados da estação profissional e da estação portátil, respectivamente, demonstrando a consistência na captura de dados ao longo de vários dias.

Figura 71 – Dados históricos - Estação Profissional (23/10/2025 - 28/10/2025).



Fonte: Autor.

Figura 72 – Dados históricos - Estação Portátil (23/10/2025 - 28/10/2025).



Fonte: Autor.

Ao analisar os gráficos, observa-se que o protótipo conseguiu reproduzir fielmente o comportamento cíclico diurno das variáveis climáticas. Nota-se a consistência na relação física entre as grandezas: nos momentos de pico de temperatura (por volta do meio-dia), ocorre a mínima da umidade relativa, comportamento observado em ambas as estações. Durante o

período analisado, não houve registro de chuvas (0 mm) em nenhum dos dois sistemas.

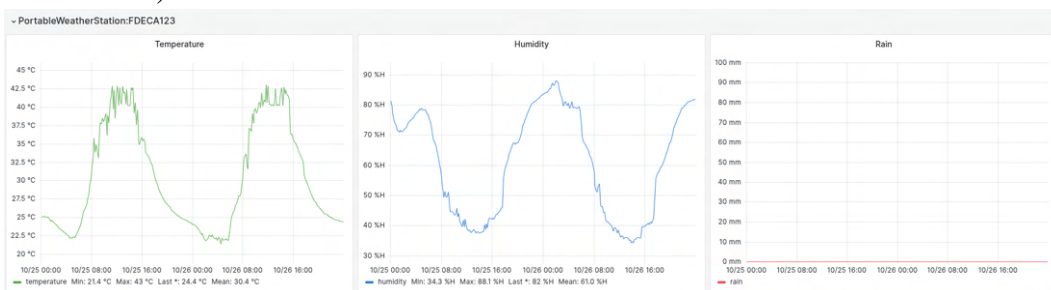
Para uma validação mais detalhada, foi realizada uma nova análise do intervalo entre 25 e 26 de outubro de 2025. Conforme observado nas Figuras 73 e 74, ambas as estações registraram os picos e quedas de temperatura em horários sincronizados. A estação portátil registrou máximas em torno de 43,0 °C, enquanto a estação profissional registrou máximas próximas a 37,0 °C.

Figura 73 – Detalhe dos dados históricos - Estação Profissional (25/10/2025 - 26/10/2025).



Fonte: Autor.

Figura 74 – Detalhe dos dados históricos - Estação Portátil (25/10/2025 - 26/10/2025).



Fonte: Autor.

Essa diferença de magnitude pode ser atribuída às condições microclimáticas de instalação. A estação profissional encontra-se em uma área sujeita a intervenções de manutenção, como a irrigação do gramado, que pode atuar como um fator de arrefecimento local. Por outro lado, o protótipo foi instalado em local aberto e sem intervenção humana, porém sem um suporte vertical adequado que distanciasse o sensor de superfícies que absorvem e irradiam calor. Apesar dessas divergências físicas e ambientais, a tendência idêntica das curvas valida a sensibilidade e a resposta do sistema desenvolvido.

Quanto à umidade, o comportamento apresentou forte correlação neste período específico. A estação portátil registrou variação entre 34,3% e 88,1%, enquanto a profissional oscilou entre 27% e 82%.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho alcançou seu objetivo principal ao desenvolver, implementar e validar um ecossistema IoT baseado no protocolo LoRaWAN para o monitoramento climático no semiárido, resultando em uma solução que concilia baixo custo, robustez operacional e eficiência energética

Do ponto de vista de hardware e eficiência energética, a escolha do microcontrolador RP2040 em conjunto com as estratégias de gerenciamento de energia (*Deep Sleep*) provou-se adequada. A validação experimental com o sensor INA219 demonstrou que o sistema opera com correntes de repouso reduzidas, garantindo uma autonomia estendida mesmo em períodos de baixa insolação, o que é crucial para estações remotas isoladas da rede elétrica. A estrutura física em impressão 3D (ABS) mostrou-se funcional para a integração dos componentes, oferecendo a proteção necessária contra condições climáticas adversas.

No que diz respeito à comunicação, a escolha do protocolo LoRaWAN demonstrou ser a tecnologia ideal para a topologia tanto do campus, quanto em regiões rurais ou urbanas dependendo da disponibilidade de sinal. A análise das métricas de SNR e RSSI confirmou que o sistema é resiliente, mantendo altas taxas de entrega de pacotes mesmo em cenários de obstrução e longa distância. A flexibilidade na alternância dos Fatores de Espalhamento (SF7 a SF12) permitiu um compromisso dinâmico entre alcance e consumo de energia, validando a aplicabilidade da solução em redes escaláveis.

Em relação à pluviometria, os experimentos de simulação de chuva foram determinantes para a validação do protótipo. Os resultados indicaram que o mecanismo de báscula impresso em 3D apresenta alta linearidade e boa precisão para chuvas leves e moderadas (até 30 mm/h), com erros relativos inferiores a 4%. Entretanto, identificou-se um comportamento não-linear em eventos de alta intensidade (40 mm/h), nos quais a energia cinética do escoamento levou à superestimativa das medições. Esse efeito não compromete o uso do sensor, mas evidencia a importância de rotinas de compensação em software, alinhando os resultados práticos com a teoria de erros intrínsecos a este tipo de instrumento.

Por fim, a integração com a plataforma em nuvem e a visualização via Grafana fecharam o ciclo da informação, transformando dados brutos em conhecimento acessível para tomada de decisão. Em síntese, o ecossistema proposto não apenas atendeu aos requisitos técnicos iniciais, mas também gerou dados científicos relevantes sobre o comportamento de sensores *low-cost* em condições de operação críticas.

6.1 Limitações do Trabalho

Apesar dos resultados satisfatórios, o desenvolvimento do projeto encontrou limitações que devem ser consideradas:

- **Validação em Longo Prazo:** Devido ao cronograma, os testes de campo e de simulação foram realizados em janelas de tempo limitadas (30 minutos para simulação e dias para campo). Não foi possível avaliar o desgaste mecânico das peças impressas em 3D ou a degradação da bateria após meses de exposição contínua à radiação ultravioleta (UV) e calor intenso do sertão central do Ceará.
- **Calibração Manual:** O método de calibração do fluxo de água, embora rigoroso, dependeu de ajuste manual e leitura visual, o que introduz uma incerteza experimental, ainda que mitigada pela repetição dos testes.
- **Abrangência de Sensores:** O protótipo focou nas variáveis principais (chuva, temperatura, umidade), não integrando sensores de radiação solar ou pressão atmosférica nesta versão, o que limitou o cálculo de evapotranspiração de referência.

6.2 Trabalhos Futuros

A partir das lições aprendidas e das limitações identificadas, sugerem-se as seguintes abordagens para a continuidade da pesquisa:

6.2.1 Implementação de Algoritmo de Correção Dinâmica

Esta é a principal contribuição de software sugerida pelos resultados experimentais. Propõe-se a evolução do *firmware* para incluir uma função de transferência baseada no tempo entre pulsos (Δt).

- O algoritmo deverá medir o intervalo entre basculamentos do sensor Hall.
- Para intervalos curtos (indicando chuva torrencial > 30 mm/h), o sistema deverá aplicar automaticamente um fator de redução ao volume contabilizado (calibrado para compensar a superestimativa de 16% observada).
- Essa abordagem, fundamentada em (Braga *et al.*, 2008), poderá elevar a precisão do equipamento sem custo adicional de hardware.

6.2.2 Portabilidade para Arquiteturas Modernas

Embora o ARM Cortex-M0+ (RP2040) tenha sido eficiente, a migração para a arquitetura RISC-V (como o ESP32-C3 ou chips dedicados de ultra-baixo consumo) pode oferecer melhorias na eficiência energética e redução de custos de licenciamento, alinhando o projeto com as tendências de hardware aberto. A adoção desta arquitetura de conjunto de instruções (ISA) aberta não apenas alinha a solução às tendências globais de *open hardware*, mas também oferece potencial superior de otimização energética em modos de baixo consumo.

6.2.3 Análise de Dados e Padrões Climáticos

Com o crescimento contínuo da base histórica de medições, torna-se recomendável a aplicação de técnicas de Ciência de Dados e *Machine Learning* sobre os dados persistidos no FIWARE. A incorporação desses métodos tem o potencial de transformar o sistema de uma ferramenta essencialmente de monitoramento para uma plataforma preditiva, capaz de antecipar a formação de microclimas locais ou de realizar a detecção automática de anomalias nos sensores.

Dessa forma, pode-se afirmar que o projeto resultou em um sistema funcional em ambiente controlado, com viabilidade para implantação em maior escala, desde que sejam conduzidas novas etapas de validação, calibração e adaptação às condições e restrições encontradas em cenários reais de operação.

REFERÊNCIAS

- AGROTHINGS. **LoRa**: uma solução para a conectividade no campo. 2024. Disponível em: <https://agrothings.net/blog/lora-uma-solucao-para-a-conectividade-no-campo/>. Acesso em: 08 nov. 2024.
- AL-KOFAHI, M. M.; AL-SHORMAN, M. Y.; AL-KOFAHI, O. M. Toward energy efficient microcontrollers and Internet-of-Things systems. **Computers & Electrical Engineering**, Elsevier, Oxford, v. 79, p. 106457, 2019.
- AMURIM, A. D. T.; SILVA, J. I. M. d.; ORTIZ, M. D.; REGO, P. A. L.; SOUZA, J. N. d. Uma solução de IoT baseada no FIWARE para gerenciamento de recursos energéticos e serviços acadêmicos em um campus universitário. In: **Anais do Workshop de Computação Urbana (CoUrb)**. Uberlândia: SBC, 2021. p. 265–278.
- ASANOVIĆ, K.; PATTERSON, D. A. **Instruction sets should be free: the case for RISC-V**. Berkeley: EECS Department, University of California, 2014. Technical Report UCB/EECS-2014-146.
- AUTOCORE ROBÓTICA. **A3144**: sensor de efeito Hall. 2025. Disponível em: <https://www.autocorerobotica.com.br/a3144-sensor-de-efeito-hall>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- BARROS, E.; CAVALCANTE, S. **Introdução aos sistemas embarcados**. Recife, 2010. 36 p. Notas de aula.
- BLAINSKI, É.; GARBOSSA, L. H. P.; ANTUNES, E. N. **Estações hidrometeorológicas automáticas**: recomendações técnicas para instalação. Florianópolis: Epagri, 2012.
- BOUGUERA, T.; DIOURIS, J.-F.; CHAILLOUT, J.-J.; JAOUADI, R.; ANDRIEUX, G. Energy consumption model for sensor nodes based on LoRa and LoRaWAN. **Sensors**, MDPI, Basel, v. 18, n. 7, p. 2104, 2018.
- BRAGA, H. J.; RICCE, W. da S.; PANDOLFO, C.; GARBOSSA, L. H. P.; MASSIGNAM, A. M.; BLAINSKI, E.; VIEIRA, H. J. A agrometeorologia catarinense: estações convencionais. **Documentos**, Florianópolis, 2015.
- BRAGA, S. M.; BRAGA, A. S.; FERNANDES, C. V. S.; SANTOS, I. Avaliação da performance de pluviômetros de báscula: sub-medição durante eventos extremos e novos esquemas de medição. In: **Anais do II Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste**. Rio de Janeiro: ABRH, 2008.
- CIRILLO, F.; SOLMAZ, G.; BERZ, E. L.; BAUER, M.; CHENG, B.; KOVACS, E. A standard-based open source IoT platform: FIWARE. **IEEE Internet of Things Magazine**, IEEE, New York, v. 2, n. 3, p. 12–18, 2020.
- CLIMA E AMBIENTE. **Pluviômetro digital com datalogger (pluviógrafo) P500**. 2025. Disponível em: <https://www.climaeambiente.com.br/prod,idproduto,4831450,pluviometro-digital-com-datalogger--pluviografo---p500>. Acesso em: 04 fev. 2025.
- ELETROGATE. **Real Time Clock (RTC) DS3231**. 2024. Disponível em: <https://www.eletrogate.com/real-time-clock-rtc-ds3231>. Acesso em: 08 nov. 2024.

ERBAKANOV, L.; STANEVA, L.; VARDEVA, I. Using a long time constant integrator in rainfall intensity measuring via acoustic method. In: **2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA)**. Bourgas: IEEE, 2018. p. 1–4.

ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 series datasheet**. Shanghai, 2025. Disponível em: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf. Acesso em: 25 nov. 2025.

FAJAR, M. C. A.; SAMIJAYANI, O. N. Realtime greenhouse environment monitoring based on LoRaWAN protocol using Grafana. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ELECTRONICS AND SMART DEVICES (ISESD), 2021, Bandung. **Proceedings...** Bandung: IEEE, 2021. p. 1–5.

FILHO, M. F. **Internet das coisas**. Palhoça: Unisul Virtual, 2016.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Página inicial**. 2025. Disponível em: <http://www.funceme.br/>. Acesso em: 07 jul. 2025.

GEOINOVA. **A importância das estações agrometeorológicas na agricultura**. 2023. Disponível em: <https://geoinova.com.br/a-importancia-das-estacoes-agrometeorologicas-na-agricultura/>. Acesso em: 08 nov. 2024.

GERMANO, S. B. **Protótipo de solução IoT para uma estação meteorológica aplicando tecnologia LoRa no ambiente agro**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica)) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG), Itumbiara, 2022.

HERNÁNDEZ, D. L.; ARIAS, J.; VILLANUEVA, D.; GUTIÉRREZ, S.; ZAVALA, I. IoT system prototype based on LoRa and the Orion Context Broker data model of FIWARE. In: IEEE INTERNATIONAL AUTUMN MEETING ON POWER, ELECTRONICS AND COMPUTING (ROPEC), 2021, Ixtapa. **Proceedings...** Ixtapa: IEEE, 2021. v. 5, p. 1–6.

INFODATAS. **Pluviômetro 140mm Incoterm**. 2025. Disponível em: <https://www.infodatas.com.br/produto/pluviometro-140mm-incoterm-4780.html>. Acesso em: 04 fev. 2025.

IVKOVIC, J.; IVKOVIC, J. L. Analysis of the performance of the new generation of 32-bit microcontrollers for IoT and Big Data application. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SOCIETY AND TECHNOLOGY (ICIST), 2017, Kopaonik. **Proceedings...** Kopaonik: Information Society of Serbia, 2017. p. 12–15.

KHUTSOANE, O.; ISONG, B.; ABU-MAHFOUZ, A. M. IoT devices and applications based on LoRa/LoRaWAN. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY (IECON), 2017, Beijing. **Proceedings...** Beijing: IEEE, 2017. p. 6107–6112.

KUMARAN, S.; SHANKAR, M. G.; KRITHIKRAJ, P.; KARTHIK, M. An intelligent framework for wireless sensor networks in environmental monitoring. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, COMPUTING AND RENEWABLE SYSTEMS (ICACRS), 2., 2023, Pudukkottai. **Proceedings...** Pudukkottai: IEEE, 2023. p. 334–340.

LUIZ-SILVA, W.; OSCAR-JÚNIOR, A. C.; CAVALCANTI, I. F. A.; TREISTMAN, F. An overview of precipitation climatology in Brazil: space-time variability of frequency and intensity associated with atmospheric systems. **Hydrological Sciences Journal**, Taylor & Francis, Wallingford, v. 66, n. 2, p. 289–308, 2021.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia**: noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

MENESES, L. S. **Protótipo de estação meteorológica utilizando plataforma IoT**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias Renováveis)) – Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, 2023.

MERCADO LIVRE. **Pluviômetro analógico com flutuador alemão TFA**. 2025. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/pluviometro-analogico-com-flutuador-alemao-tfa-tfa>. Acesso em: 04 fev. 2025.

METALÚRGICA CHICORA. **Pluviômetro Ville de Paris**. 2025. Disponível em: <https://metalurgicachicora.com.br/loja/equipamentos/pluviometro-ville-de-paris>. Acesso em: 04 fev. 2025.

MILANESI, M. A.; ALVES, R. R.; GALVANI, E. Comparativo entre instrumentos pluviométricos experimentais e automáticos. In: **Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento**. Campinas: Instituto de Geociências - UNICAMP, 2017. v. 1, p. 2251–2261.

MILAROKOSTAS, C.; TSOLKAS, D.; PASSAS, N.; MERAKOS, L. A comprehensive study on LPWANs with a focus on the potential of LoRa/LoRaWAN systems. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, IEEE, New York, v. 25, n. 1, p. 825–867, 2022.

MONTEIRO, J. E. B. A. **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), 2009.

MOREIRA, E. E. M. **Desenvolvimento de uma miniestação meteorológica de baixo custo baseada na plataforma Arduino**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Redes de Computadores)) – Universidade Federal do Ceará (UFC), Quixadá, 2019.

NASCIMENTO, A. J. da S.; DENADAI, M. S. *et al.* Agrometeorologia aplicada à agricultura. **Tekhne e Logos**, Botucatu, v. 14, n. 3, p. 30–37, 2023.

NOR, R. F. A. M.; ZAMAN, F. H. K.; MUBDI, S. Smart traffic light for congestion monitoring using LoRaWAN. In: **2017 IEEE 8th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC)**. Shah Alam: IEEE, 2017. p. 132–137.

PERAZZI, P. R.; PASSAMANI, M.; THIELEN, D.; PADOVANI, C. O tradicional ou o moderno?: uma visão da informação da rede de estações meteorológicas brasileiras. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, São José dos Campos, v. 36, n. 3, p. 351–366, 2021.

RADIOENGE. **Gateway LoRaWAN**. 2025. Disponível em: <https://www.radioenge.com.br/produto/gateway-lorawan/>. Acesso em: 10 out. 2025.

SAMPAIO, G.; DIAS, P. L. da S. Evolução dos modelos climáticos e de previsão de tempo e clima. **Revista USP**, São Paulo, n. 103, p. 41–54, 2014.

SANTOS, B. P.; SILVA, L. A.; CELES, C. S. F. S.; BORGES, J. B.; NETO, B. S. P.; VIEIRA, M. A. M.; VIEIRA, L. F. M.; GOUSSEVSKAIA, O. N.; LOUREIRO, A. A. F. Internet das coisas: da teoria à prática. In: **MINICURSOS DO SIMPÓSIO BRASILEIRO DE REDES DE COMPUTADORES E SISTEMAS DISTRIBUÍDOS (SBRC)**, 34., 2016, Natal/RN. **Anais...** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), 2016. p. 16.

SILVA, C. M.; FERREIRA, W. J.; FISCH, G. Comparativo entre dados de precipitação obtidos por pluviômetros Tipping Bucket Rain Gauges e pluviômetro Ville de Paris em Taubaté/SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 16., 2011, Petrolina. **Anais...** Petrolina: SBA, 2011.

SILVA, J. de C.; RODRIGUES, J. J. P. C.; ALBERTI, A. M.; SOLIC, P.; AQUINO, A. L. L. LoRaWAN: a low power WAN protocol for Internet of Things: a review and opportunities. In: INTERNATIONAL MULTIDISCIPLINARY CONFERENCE ON COMPUTER AND ENERGY SCIENCE (SPLITECH), 2., 2017, Split. **Proceedings...** Split: IEEE, 2017. p. 1–6.

SMART KITS. **Módulo transceptor LoRa 915MHz SX1276 com antena**. 2025. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/modulo-transceptor-lora-915mhz-sx1276-com-antena>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SMART KITS. **Sensor de temperatura e umidade SHT30 IP44**. 2025. Disponível em: <https://www.smartkits.com.br/sensor-de-temperatura-e-umidade-sht30-ip44>. Acesso em: 20 jan. 2025.

SMART SOLUTIONS 4 HOME. **SS4H RG rain gauge**. 2025. Disponível em: <https://smartsolutions4home.com/ss4h-rg-rain-gauge/>. Acesso em: 25 jul. 2025.

STRASSBURGER, A. S.; MENEZES, A. J. E. A. d.; PERLEBERG, T. D.; EICHOLZ, E. D.; MENDEZ, M. E. G.; SCHÖFFEL, E. R. Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática. **Revista Brasileira de Meteorologia**, SciELO Brasil, São José dos Campos, v. 26, p. 273–278, 2011.

WANG, J.; LIM, M. K.; WANG, C.; TSENG, M.-L. The evolution of the Internet of Things (IoT) over the past 20 years. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, Oxford, v. 155, p. 107174, 2021.

WAVESHARE. **RP2040-Zero**. 2025. Disponível em: <https://www.waveshare.com/wiki/RP2040-Zero>. Acesso em: 20 jan. 2025.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). **Guide to instruments and methods of observation**. Geneva: WMO, 2018. v. 3. (WMO-No. 8, v. 3).

YINBIAO, S.; LEE, K.; LANCTOT, P.; JIANBIN, F.; HAO, H.; CHOW, B.; DESBENOIT, J.-P. **Internet of Things: wireless sensor networks**. Geneva: International Electrotechnical Commission (IEC), 2014. White Paper.

YIU, J. **The definitive guide to ARM® Cortex®-M0 and Cortex-M0+ processors**. Oxford: Academic Press, 2015.