



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
TECNÓLOGO EM ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE SISTEMAS

RYAN FAUSTINO CARVALHO

AGRICULTURA CONECTADA: SISTEMA DE MONITORAMENTO DE IRRIGAÇÃO
INTELIGENTE E ACESSÍVEL PARA PEQUENOS PRODUTORES

TERESINA, PIAUÍ
2025

RYAN FAUSTINO CARVALHO

AGRICULTURA CONECTADA: SISTEMA DE MONITORAMENTO DE IRRIGAÇÃO
INTELIGENTE E ACESSÍVEL PARA PEQUENOS PRODUTORES

Trabalho de Conclusão de Curso (Relatório Técnico de Software) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. M^º. Francisco Marcelino Almeida de Araújo

TERESINA, PIAUÍ
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Carvalho, Ryan Faustino

C331a Agricultura conectada : sistema de monitoramento de irrigação inteligente e acessível para pequenos produtores / Ryan Faustino Carvalho. - 2025.
45 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central, 2025.

Orientador : Prof Me. Francisco Marcelino Almeida de Araújo.

1. Agricultura 4.0. 2. Internet das coisas. 3. Sistema embarcados. 4. Agricultura familiar. I. Título.

CDD - 004.21

Elaborado por Tanize Maria Sales CRB 3/1024

RYAN FAUSTINO CARVALHO

AGRICULTURA CONECTADA: SISTEMA DE MONITORAMENTO DE IRRIGAÇÃO
INTELIGENTE E ACESSÍVEL PARA PEQUENOS PRODUTORES

Trabalho de Conclusão de Curso (Relatório Técnico de Software) apresentado como exigência parcial para obtenção do diploma do Curso de Tecnólogo em Análise e Desenvolvimento de Sistemas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Campus Teresina Central.

Aprovada em 16 de Dezembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. M^e. Francisco Marcelino
Almeida de Araújo**

Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí -
IFPI

**Prof. M^e. Fernando Castelo
Branco Goncalves Santana**

Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí -
IFPI

**Prof. M^e. Wilson de Oliveira
Junior**

Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí -
IFPI

**Antonio Kauê Cavalcante
Ferreira**

Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Piauí -
IFPI

À minha família

À meus educadores.

À todos que seguiram comigo nessa trajetória.

AGRADECIMENTOS

A todos que me acompanharam nesta jornada de ensino.

Aos meus educadores, que me transmitiram o conhecimento necessário para chegar aqui.

Em especial, agradeço aos meus pais, Francimar Faustino Soares e Elenice Pereira de Carvalho, que, mesmo diante de todas as dificuldades que surgiram pelo caminho, sempre apoiaram minha educação e formação. Vocês foram meus principais educadores, meu alicerce e minha maior fonte de força. Tudo o que conquistei até aqui é reflexo do amor e da dedicação que vocês sempre me ofereceram.

À minha namorada, que esteve sempre ao meu lado durante todas as adversidades e me ajudou a concluir meu objetivo. Sua presença constante foi fundamental para que eu pudesse chegar até aqui. Sou extremamente grato por seu apoio e amor.

À minha avó, Antônia Pereira do Rêgo, minha segunda mãe, cuja sabedoria e amor incondicional foram indispensáveis ao longo da minha trajetória. Sua presença foi um guia nos momentos mais difíceis e uma inspiração constante para nunca desistir.

Aos meus irmãos, espero que minha trajetória sirva de inspiração para vocês. Que vejam em cada desafio superado a prova de que é possível alcançar nossos sonhos com esforço e determinação. Estou sempre aqui para apoiar vocês em suas jornadas.

E, por fim, aos meus amigos, sou grato pelos conselhos, pelas boas conversas e pelas brincadeiras que tornaram esta jornada mais leve e divertida.

*“Nunca estou realmente satisfeita quanto a entender alguma coisa;
porque, até onde entendo, a minha compreensão
só pode ser uma fração infinitesimal
de tudo o que eu quero compreender”.*
Ada Lovelace

RESUMO

A transição para a Agricultura 4.0, impulsionada por tecnologias como a Internet das Coisas (IoT), oferece um vasto potencial para otimizar a produção agrícola, contudo, o alto custo e a complexidade das soluções comerciais representam uma barreira significativa para a adoção por parte da agricultura familiar. O presente trabalho apresenta o desenvolvimento do “Agricultura Conectada”, um sistema de monitoramento de irrigação inteligente e de baixo custo, projetado para ser acessível a pequenos produtores. A metodologia consistiu no desenvolvimento de um protótipo funcional composto por um Nó Sensor de campo (*ESP32-LoRa*) para a coleta de dados agrônômicos e uma Estação Base (*Gateway*) para a transmissão das informações via protocolo *LoRaWAN*. A inovação central do projeto reside na sua arquitetura de baixo custo, que integra plataformas de software de código aberto (*Firebase e Grafana*) e, crucialmente, na reutilização sustentável de *hardware* eletrônico, como aparelhos *TV Box* descaracterizados para a visualização dos dados. Como resultado, validou-se em um ambiente de horta um protótipo totalmente funcional, capaz de coletar, transmitir, armazenar e exibir os dados em tempo real. Conclui-se que o trabalho comprova a viabilidade técnica de uma arquitetura de IoT acessível e apresenta um modelo replicável e sustentável para a democratização da agricultura de precisão, oferecendo uma ferramenta poderosa para a gestão hídrica e para o empoderamento do agricultor familiar.

Palavras-chaves: agricultura 4.0; internet das coisas; sistemas embarcados; agricultura familiar.

ABSTRACT

The transition to Agriculture 4.0, driven by technologies such as the Internet of Things (IoT), offers vast potential for optimizing agricultural production. However, the high cost and complexity of commercial solutions represent a significant barrier to adoption by family farms. This paper presents the development of “Connected Agriculture,” a low-cost, smart irrigation monitoring system designed to be accessible to small producers. The methodology consisted of developing a functional prototype composed of a field sensor node (*ESP32-LoRa*) for collecting agronomic data and a base station (*Gateway*) for transmitting information via the *LoRaWAN* protocol. The central innovation of the project lies in its low-cost architecture, which integrates open-source software platforms (*Firebase and Grafana*) and, crucially, in the sustainable reuse of electronic hardware, such as decharacterized TV Box devices for data visualization. As a result, a fully functional prototype capable of collecting, transmitting, storing, and displaying data in real time was validated in a vegetable garden environment. It is concluded that the work proves the technical feasibility of an accessible IoT architecture and presents a replicable and sustainable model for the democratization of precision agriculture, offering a powerful tool for water management and the empowerment of family farmers.

Keywords: agriculture 4.0; internet of things; embedded systems; family farming.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Arquitetura de comunicação <i>LoRaWAN</i>	23
Figura 2 – Diagrama de casos de uso do sistema	29
Figura 3 – Jornada do Agricultor	31
Figura 4 – Subfluxo de envio de alertas em tempo real	32
Figura 5 – Fluxo de instalação do sistema (Jornada do Administrador)	34
Figura 6 – Arquitetura de implementação do sistema	35
Figura 7 – Tela de login da plataforma Grafana Labs	36
Figura 8 – Nó sensor em detalhe.	40
Figura 9 – Terminal de visualização (<i>TvBox</i> Reaproveitada).	40
Figura 10 – Captura de dados da plantação.	41
Figura 11 – Estrutura dos dados brutos armazenados no banco de dados Firestore.	42
Figura 12 – Dashboard com dados coletados em tempo real.	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
API	Application Programming Interface
BasS	Backend as a Service
CONTAG	Conselho Nacional de Agricultura e Gestão
HTML	HyperText Markup Language
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IDE	Integrated Development Environment
IoT	Internet of Things
JSON	JavaScript Object Notation
LoRa	Long Range
LoRaWAN	Long Range Wide Area Network
RFB	Receita Federal do Brasil
SE	Sistema Embarcado
SoC	System on a Chip
SPI	Serial Peripheral Interface
GPIO	General Purpose Input/Output

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	TECNOLOGIAS ENVOLVIDAS	17
2.1	ESPECIFICAÇÕES DE HARDWARE DO SISTEMA EMBARCADO	17
2.1.1	Microcontrolador ESP-32 LoRa	17
2.1.2	TvBox recuperada	18
2.1.3	Sensores	19
2.1.4	Atuadores	19
2.2	FERRAMENTAS DE SOFTWARE	20
2.2.1	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE)	20
2.2.2	Linguagem de Programação C++	20
2.2.3	Bibliotecas	21
2.2.3.1	<i>WiFiConnectionManager</i>	21
2.2.3.2	<i>Heltec ESP32 LoRaWAN library</i>	22
2.2.3.3	<i>FirebaseClient</i>	22
2.2.4	Protocolo LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)	22
2.2.5	Grafana: A Plataforma de Visualização	23
2.2.6	Telegram Bot: O Sistema de Alertas	24
2.2.7	Firebase: O Backend de Dados em Tempo Real	25
2.2.8	Programas Utilitários	25
3	MODELAGEM DO PROJETO	26
3.1	LEVANTAMENTO DE REQUISITOS	26
3.1.1	Requisitos Funcionais	26
3.1.2	Requisitos Não Funcionais	27
3.2	DIAGRAMA DE CASO DE USOS	27
3.2.1	Casos de Uso do Ator Agricultor	27
3.2.2	Casos de Uso do Ator Administrador	28
3.3	DIAGRAMA DE FLUXO	29
3.3.1	Fluxo de Utilização pelo Agricultor	29
3.3.2	Fluxo de Configuração e Provisionamento	32
3.4	ARQUITETURA DO SISTEMA	34
3.5	INTERFACE DE USUÁRIO	36

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	PESQUISA DE CUSTO	38
4.2	IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO EM CAMPO . .	38
4.2.1	Estrutura e Validação do Fluxo de Dados	41
4.3	RESULTADOS DO MONITORAMENTO EM TEMPO REAL	42
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	43
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
	REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A trajetória do desenvolvimento industrial pode ser interpretada como uma busca contínua pela otimização de processos através da automação e da aplicação da inteligência para resolver desafios complexos. O trabalho elaborado por Flamino (2022) fortalece a ideia de que cada revolução industrial, desde a primeira no século XVIII, representa um novo paradigma na forma como a inovação é aplicada para superar as limitações produtivas da época. Este mesmo impulso histórico, agora potencializado por avanços sem precedentes em computação e conectividade, manifesta-se hoje na forma da revolução digital. Mais do que uma mudança técnica, essa transformação contemporânea é impulsionada por dados e informação. Segundo Robertstone & Lapina (2023), a transformação digital atua como um catalisador fundamental nesse cenário, funcionando como um fator habilitador que integra a sustentabilidade e a inovação aberta para redefinir a criação de valor e a eficiência organizacional.

Neste cenário de rápida evolução tecnológica, a agricultura, um dos pilares fundamentais da economia mundial, emerge como um campo fértil para a aplicação de tecnologias inovadoras. A chamada *Agricultura 4.0* representa uma nova fronteira, em que conceitos avançados como a Internet das Coisas (*IoT*), inteligência artificial e análise de grandes quantidades de informações convergem para revolucionar as práticas agrícolas atuais (ARAUJO; JUNIOR; SANTANA, 2024).

A Internet das Coisas (*IoT*) destaca-se como uma tecnologia transformadora no setor agrícola. Esta rede interconectada de dispositivos e sensores permite o monitoramento em tempo real de variáveis cruciais, como condições do solo, clima e saúde das culturas, possibilitando uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos disponíveis (STROPARO, 2024).

Dentro do conceito de *IoT*, a agricultura de precisão se volta ao uso de tecnologias avançadas como drones, microcontroladores e sensores para monitorar e gerenciar a variabilidade das condições agrícolas em nível de campo, com o objetivo de aumentar a eficiência e a sustentabilidade da produção. Viana *et al.* (2024) registra que essa abordagem permite que os agricultores tomem decisões mais informadas sobre o uso de insumos, como água, fertilizantes e defensivos, resultando em uma produção mais sustentável e econômica, embora essa tecnologia encontre barreiras para a ampla implementação no país.

Diante desse contexto, Sanyaolu & Sadowski (2024) destacam que a implementação de tecnologias de agricultura de precisão (AP) não somente aumenta a produtividade das culturas, mas ainda contribui para a redução dos custos operacionais e do impacto ambiental. A pesquisa revela que, apesar dos benefícios potenciais, a adoção de AP enfrenta desafios significativos, especialmente em relação ao custo

inicial e à variabilidade no tamanho das propriedades. O estudo enfatiza que, para maximizar os benefícios da agricultura de precisão, é fundamental que os agricultores tenham acesso a suporte técnico e financeiro, o que pode facilitar a adoção dessas tecnologias inovadoras e promover uma agricultura mais sustentável.

Segundo dados do Anuário Estatístico da Agricultura Familiar, elaborado pelo Conselho Nacional de Agricultura e Gestão (CONTAG), a agricultura familiar representa cerca de 77% de unidades de prática agrícola do total do país (FETAESC, 2024), o que totaliza uma área total de produção de 80 milhões de hectares. Segundo o anuário, essa prática não apenas sustenta milhões de famílias, mas também é responsável por 23% do valor bruto da produção agropecuária e por 67% das ocupações no campo, empregando cerca de 10,1 milhões de trabalhadores.

O acesso à tecnologia e a preparação técnica permanecem como desafios significativos no setor agrícola. Uma pesquisa conduzida por Bolfe, Jorge & Sanches (2022) revelou que 84% dos produtores rurais entrevistados utilizam alguma forma de tecnologia em suas operações agrícolas. No entanto, observa-se uma correlação inversa entre a adoção tecnológica e o nível de complexidade das soluções disponíveis. Silva *et al.* (2024) mostra que sistemas de irrigação totalmente manuais, atualmente mais utilizados por produtores agrícolas de pequeno porte, têm eficácia significativamente menor comparada a um sistema com o uso de tecnologia para automatização do processo.

Silva *et al.* (2024) ainda mostra que o principal fator limitante para a adoção dessas tecnologias é o custo de aquisição, que inclui máquinas, equipamentos e aplicativos. Esta realidade evidencia que, apesar do potencial da transformação digital para otimizar a eficiência e sustentabilidade agrícola, os produtores ainda enfrentam obstáculos significativos, principalmente relacionados à conectividade e ao acesso a financiamento.

O trabalho elaborado por Laurett (2020) também detalha o custo como uma das principais barreiras para sustentabilidade na agricultura familiar. Soluções comerciais para monitoramento remoto de lavouras, como estações meteorológicas com telemetria, possuem um custo de aquisição alto, muitas vezes associado a um modelo de assinatura de software com mensalidades que podem ser proibitivas para a agricultura familiar. Este cenário de alto custo cria um vácuo no mercado e reforça a necessidade de modelos alternativos que priorizem a acessibilidade sem sacrificar a funcionalidade.

É neste contexto que surge uma proposta inovadora: o vínculo e o reaproveitamento de dispositivos eletrônicos apreendidos pela Receita Federal do Brasil (RFB). Em 2022, a RFB realizou uma operação na cidade de Resende, Rio de Janeiro, que resultou na destruição de mais de 200 mil aparelhos eletrônicos conhecidos como *TvBox* utilizados para transmissões ilegais. O custo de produção desses aparelhos, somado, resulta no valor total estimado de 14 milhões de reais (FEDERAL, 2022).

Visando mitigar esse desperdício e promover o retorno social, a RFB idealizou o Projeto Além do Horizonte. Iniciada em dezembro de 2021, a proposta converte produtos não homologados em equipamentos de relevância social, transformando receptores de *TvBox* retidos em minicomputadores para escolas públicas. A iniciativa, pautada em princípios de sustentabilidade e originalidade, opera em rede através de parcerias com a Anatel, que fornece apoio técnico para homologação e diversas Instituições de Ensino Superior (IES), como a Universidade Federal de Lavras (UFLA) e Institutos Federais, responsáveis pela readequação tecnológica dos bens (SINDIRECEITA, 2022).

Diante da necessidade de soluções tecnológicas economicamente viáveis, surge uma solução sustentável: o reaproveitamento desses dispositivos após sua devida descaracterização e reprogramação, bem como a submissão do presente projeto à quarta onda do programa "Além do Horizonte". Embora originalmente destinados ao streaming ilegal de conteúdo, estes aparelhos possuem capacidade de hardware suficiente para funcionar como terminais de exibição de dados coletados por sensores, conforme demonstrado por Lopes (2023), representando uma alternativa de baixo custo para pequenos produtores.

O presente trabalho visa desenvolver uma solução tecnológica integrando sistemas embarcados de baixo custo direcionados à agricultura familiar. A proposta fundamenta-se na reutilização sustentável de dispositivos eletrônicos recuperados, especificamente aparelhos *TV Box* apreendidos em operações da RFB, visando criar ferramentas tecnológicas acessíveis para pequenos produtores rurais, alinhada com os aspectos sociais do programa "Além do Horizonte".

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver uma solução tecnológica de baixo custo para o monitoramento de variáveis agrônomicas em tempo real, integrada a um sistema de acionamento para irrigação. A ferramenta visa prover ao agricultor familiar um meio acessível para a gestão hídrica de precisão, garantindo maior eficiência e apoio operacional.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um protótipo funcional que integre uma unidade sensora inteligente (*ESP32-LoRa*) a um terminal de visualização baseado em aparelhos *TV Box* reaproveitados, demonstrando a viabilidade técnica da implementação com o programa "Além do Horizonte";
- Implantar um sistema de controle automatizado de irrigação, com foco em reduzir

desperdícios e otimizar o uso de água no cultivo;

- Implementar plataformas de visualização dinâmica para apresentar os dados coletados de forma intuitiva e acessível, facilitando a interpretação por parte dos agricultores rurais;
- Promover tecnologias agrícolas acessíveis através da reutilização ética de componentes eletrônicos apreendidos em atividades ilícitas, que de outra forma seriam descartados.

2 TECNOLOGIAS ENVOLVIDAS

Diante do exposto acima, o processo de construção do sistema seguiu as diretrizes abordadas na construção de sistemas embarcados.

Segundo Kamal (2009) um sistema embarcado (SE) é projetado para realizar uma função específica e opera com recursos limitados. O desenvolvimento de sistemas embarcados envolve etapas como definição de requisitos, escolha de hardware, desenvolvimento de *firmware/software*, integração e testes.

Tendo em vista as especificações do projeto, as tecnologias utilizadas foram organizadas em três grupos principais: o *hardware* necessário para a execução do sistema, o conjunto de ferramentas de software utilizadas no desenvolvimento e os programas utilitários que auxiliarão na produção. Abaixo, cada grupo é descrito detalhadamente.

2.1 ESPECIFICAÇÕES DE HARDWARE DO SISTEMA EMBARCADO

Embora o foco deste trabalho seja o software apresentado, é importante destacar os dispositivos de *hardware* que servem como base para a implementação do sistema. O *hardware* utilizado inclui:

2.1.1 Microcontrolador ESP-32 LoRa

O núcleo de processamento e comunicação dos nós sensores deste projeto baseia-se no System on a Chip (SoC) ESP32. Desenvolvido pela Espressif Systems e lançado oficialmente em 2016, o ESP32 surgiu como uma evolução natural do seu antecessor, o ESP8266, visando suprir lacunas de segurança, conectividade Bluetooth e capacidade de processamento em aplicações de Internet das Coisas (IoT) (ESPRESSIF SYSTEMS, 2016).

Em termos de arquitetura, o ESP32 destaca-se por possuir um processador *Xtensa Dual-Core 32-bit LX6*, que pode operar em frequências de até 240 MHz. Essa capacidade computacional é significativamente superior à maioria dos microcontroladores de baixo custo utilizados em redes de sensores, permitindo não apenas a leitura de dados, mas também o pré-processamento local antes da transmissão, uma técnica conhecida como *Edge Computing* (KHAN *et al.*, 2019). Além disso, o dispositivo integra nativamente comunicação Wi-Fi (802.11 b/g/n) e Bluetooth (v4.2 BR/EDR e BLE), oferecendo versatilidade na topologia de rede.

Para o contexto deste trabalho, utiliza-se especificamente o módulo de desenvolvimento conhecido como *WiFi LoRa 32*, desenvolvido pela empresa de soluções em automação Heltec (HELTEC AUTOMATION, 2025). Esta placa integra o SoC ESP32 a um

transceptor de rádio LoRa da Semtech, comunicando-se internamente via interface SPI (*Serial Peripheral Interface*).

Enquanto o ESP32 gerencia a lógica da aplicação e os sensores através de suas múltiplas portas GPIO (*General Purpose Input/Output*), o módulo LoRa viabiliza a comunicação de longo alcance (quilômetros) com baixo consumo energético, superando as limitações de alcance do Wi-Fi tradicional em cenários rurais ou urbanos densos. O modelo *WiFi LoRa 32* consolida esses recursos em uma única placa de desenvolvimento, facilitando a prototipagem rápida e apresentando eficácia para os objetivos de monitoramento remoto propostos (HELTEC AUTOMATION, 2025).

2.1.2 TvBox recuperada

Em virtude da parceria com a Receita Federal através do programa “Além do Horizonte”, foram doadas ao projeto um total de 15 unidades de *TvBox*. O primeiro passo técnico consistiu em um processo de triagem, no qual foram selecionados os modelos cuja arquitetura de hardware fosse compatível com distribuições *Linux* para processadores ARM. Esta compatibilidade é crucial, pois permite a descaracterização completa do software original e a instalação de um sistema operacional de código aberto, flexível e seguro.

Os aparelhos selecionados são baseados no *System-on-a-Chip* (SoC) *Rockchip RK3229*, um chipset projetado para dispositivos de *streaming* de mídia. Suas principais especificações técnicas, conforme o *datasheet* do fabricante, são detalhadas (ROCKSHIP, 2016):

- **Processador (CPU):** *Quad-core ARM Cortex-A7* de 32 bits, operando a até 1.5 GHz;
- **Memória RAM:** Os modelos utilizados possuem 1 GB de memória DDR3.
- **Armazenamento Interno:** 8 GB de memória flash eMMC;
- **Conectividade:** Portas Ethernet e *WiFi* integrados, além de saída *HDMI*.

Essas especificações, embora modestas para um computador de uso geral, são perfeitamente adequadas para a função de terminal de visualização dedicado. A descaracterização foi realizada com a instalação do sistema operacional Armbian, uma distribuição *Linux* baseada em Debian, otimizada para dispositivos de placa única (*single-board computers*) e sistemas embarcados. A escolha do Armbian é estratégica por sua leveza, estabilidade e pelo vasto repositório de software que herda do Debian, conforme destacado por Escola & Freitas (2020). Isso permitiu a instalação do navegador *web Firefox*, configurado para iniciar automaticamente em modo tela-cheia (*kiosk mode*), transformando o dispositivo em um terminal dedicado exclusivamente à visualização do *dashboard* interativo, sem intervenção do usuário.

2.1.3 Sensores

A coleta de dados ambientais é o ponto de partida de todo o sistema. Para a validação do protótipo, foi implementado um nó sensor com uma configuração base, projetada para monitorar as variáveis agronômicas mais críticas para o controle da irrigação. Os sensores específicos utilizados nesta configuração estão detalhados a seguir.

- **DHT-11:** Este sensor é utilizado para realizar leituras de temperatura e umidade do ar. Ele opera em uma faixa de temperatura de 0 a 50 °C e mede a umidade relativa de 20% a 90%. O DHT-11 utiliza um protocolo digital, facilitando sua conexão com microcontroladores como o ESP32 (ELECTRONICS, 2025). É ideal para aplicações em ambientes internos e externos, contribuindo para o monitoramento das condições climáticas;
- **Sensor de Umidade do Solo S12:** O sensor S12 mede a umidade do solo mediante hastes metálicas resistentes à corrosão inseridas no solo. Ele é projetado para evitar o contato direto com a água, garantindo medições precisas. As leituras deste sensor são essenciais para otimizar a irrigação, ajudando a garantir que as plantas recebam a quantidade adequada de umidade (CIRCUITO, 2025);
- **Sensor de Vazão de Água YF-S201:** Para quantificar o consumo de água, foi integrado o sensor de vazão YF-S201. Instalado na tubulação, ele mede o volume de líquido que passa por ele, permitindo que o sistema calcule tanto a vazão instantânea quanto o volume total consumido. A inclusão deste sensor transforma o sistema de uma ferramenta de monitoramento para uma de gestão de recursos hídricos (HandsOn Technology, 2025).

2.1.4 Atuadores

Enquanto os sensores permitem que o sistema colete informações no ambiente, os atuadores utilizados pelo sistema permite que ele seja ativo, ou seja, tome ações baseadas nos dados capturados. Para fechar o ciclo de automação e atender ao objetivo de controle da irrigação, foi implementado um módulo de acionamento baseado em um relé, conforme descrito abaixo.

- **Módulo Relé 5V:** Para controlar a bomba d'água, que opera com uma tensão e corrente superiores às que o ESP32 pode fornecer diretamente, foi utilizado um módulo relé. O relé funciona como um interruptor eletromecânico: um sinal de baixo nível (3.3V) enviado por uma porta GPIO do microcontrolador é suficiente para acionar o relé, que por sua vez fecha um circuito de alta potência, ligando ou desligando a bomba de irrigação. Este componente é, portanto, o elo que traduz

a lógica digital contínua de coleta de dados relacionados a umidade do solo em uma ação física no mundo real.

É importante ressaltar que a configuração de sensores descrita acima representa o conjunto utilizado para a validação deste projeto. A arquitetura do nó sensor, no entanto, foi projetada de forma modular. Graças à versatilidade do microcontrolador ESP32, que dispõe de múltiplas portas de entrada/saída (GPIO) (ESPRESSIF SYSTEMS, 2016), o sistema pode ser facilmente expandido. Conforme a necessidade específica de uma cultura ou de um produtor, outros sensores podem ser acoplados ao mesmo nó sensor, enriquecendo a coleta de dados sem a necessidade de alterações significativas na arquitetura de comunicação ou de software.

2.2 FERRAMENTAS DE SOFTWARE

Esta seção descreve as ferramentas de software utilizadas no desenvolvimento do sistema embarcado, incluindo ambientes de programação, bibliotecas e *frameworks*.

2.2.1 Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE)

O desenvolvimento de *firmware* para dispositivos IoT demanda um ambiente robusto, capaz de gerenciar não apenas a edição de código, mas também o ciclo de vida das dependências e a compatibilidade entre diferentes versões de bibliotecas. Diante dessa complexidade, o ambiente de desenvolvimento escolhido para este projeto foi o *PlatformIO*, um ecossistema profissional para sistemas embarcados que opera integrado ao editor *Visual Studio Code* (VS Code) (PLATFORMIO, 2025).

A escolha desta ferramenta fundamenta-se na necessidade de modularidade e organização do código. Conforme observado por Sabo, Umaru & Yusuf (2025), o uso do PlatformIO proporciona ganhos significativos em manutenibilidade da base de código quando comparado a ambientes tradicionais, como o *Arduino IDE*. Essa vantagem decorre de funcionalidades como o gerenciamento declarativo de dependências e ferramentas avançadas de depuração e estilo de escrita do código, o chamado *linting*.

Dessa forma, a ferramenta foi empregada para escrever, compilar e carregar o *firmware* no microcontrolador *ESP-32*. A ampla documentação disponível e a gestão eficiente de bibliotecas facilitaram a integração dos diversos sensores e do protocolo LoRa.

2.2.2 Linguagem de Programação C++

A linguagem *C*, criada em 1972, é tradicionalmente classificada como uma linguagem de médio nível por oferecer abstrações mais produtivas do que *Assembly*, mas ainda mantendo controle direto sobre hardware e memória (FINISTAO; BARBOSA, 2019).

Sua evolução natural, o *C++*, foi projetada para incorporar conceitos de orientação a objetos sem perder a eficiência e o domínio sobre recursos que tornaram *C* tão popular em sistemas embarcados.

De acordo com Herity (1998), muitos dos mitos que associam *C++* a códigos lentos ou binários maiores não se sustentam quando se observa como o compilador realmente gera o código. Grande parte das funcionalidades de *C++* não adiciona nenhum custo em tempo de execução, pois são tratadas apenas na fase de compilação. Além disso, quando usados de forma adequada, recursos como classes, operadores, construtores e destrutores podem produzir código tão eficiente quanto o equivalente escrito manualmente em *C*.

O trabalho citado ainda reforça que no contexto atual de IoT e sistemas embarcados, essa característica é particularmente relevante: *C* e *C++* permanecem amplamente utilizados justamente por permitirem controle preciso de memória, tempo de execução e acesso direto a registradores, ao mesmo tempo em que *C++* oferece modelos de programação mais seguros e modulares. Assim, a linguagem escolhida para o projeto combina o baixo nível necessário para microcontroladores com abstrações modernas que facilitam organização, reuso, manutenção e confiabilidade do software, características essenciais para aplicações embarcadas contemporâneas.

2.2.3 Bibliotecas

A escolha das bibliotecas foi fundamental para garantir a eficiência e a eficácia do sistema desenvolvido, pois elas fornecem as ferramentas de alto nível necessárias para interagir com o hardware e implementar as funcionalidades almejadas para o projeto.

2.2.3.1 *WiFiConnectionManager*

Essa biblioteca é utilizada para realizar de forma facilitada a conexão a uma rede *Wi-Fi* nos dispositivos *ESP-32* de forma interativa. Sua função é abstrair a complexidade da configuração de rede *Wi-Fi* para o usuário final. Em vez de exigir que as credenciais da rede (*SSID* e senha) sejam gravadas diretamente no código-fonte do firmware, esta biblioteca implementa um portal cativo. Ao ser ligado pela primeira vez ou ao perder a conexão, o *gateway ESP-32* cria seu próprio ponto de acesso *Wi-Fi* temporário (TZAPU, 2025). O usuário (administrador ou agricultor) pode então se conectar a essa rede com um celular ou computador, acessar uma página web simples servida pelo próprio microcontrolador e inserir as credenciais da rede local. Uma vez salvas, o dispositivo se conecta automaticamente, tornando o processo de instalação amigável e acessível para usuários sem conhecimento técnico em programação.

2.2.3.2 *Heltec ESP32 LoRaWAN library*

Para a comunicação sem fio entre o nó sensor em campo e o *gateway*, foi utilizada o SDK oficial Heltec ESP32 LoRaWAN library (HELTEC, 2025). Esta biblioteca fornece uma camada de abstração de alto nível sobre o hardware de rádio LoRa do microcontrolador Heltec, simplificando a implementação do protocolo LoRaWAN. Sua utilização foi fundamental para garantir uma comunicação de longo alcance e baixo consumo de energia, características essenciais para um dispositivo alimentado por bateria em um ambiente rural. A biblioteca gerencia as complexidades do protocolo, como a inicialização do rádio, a configuração de frequência, a formatação dos pacotes de dados e o tratamento das confirmações de envio, permitindo que o desenvolvedor se concentre na lógica da aplicação.

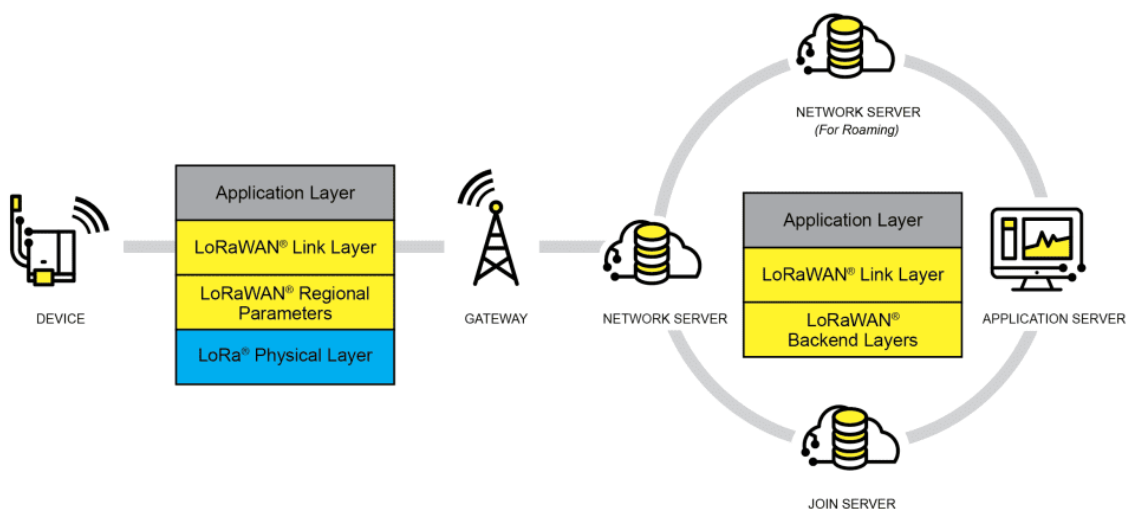
2.2.3.3 *FirebaseClient*

A biblioteca FirebaseClient foi a responsável por realizar a ponte entre o *gateway* e a plataforma de dados em nuvem (MOBIZT, 2025). Integrar um microcontrolador a um serviço web moderno como o Firebase pode ser complexo, envolvendo o gerenciamento de conexões seguras (HTTPS), a formatação de requisições com o formato JSON (JavaScript Object Notation) e o tratamento de tokens de autenticação. Esta biblioteca encapsula toda essa complexidade em um conjunto de funções simplificadas. Com ela, o firmware do *gateway* pode, com poucas linhas de código, autenticar-se no serviço e enviar os dados recebidos dos sensores diretamente para o banco de dados Firestore. A utilização desta biblioteca foi uma decisão estratégica para acelerar o desenvolvimento do firmware, garantir uma comunicação segura e confiável com a nuvem e reduzir a quantidade de memória e processamento necessários no microcontrolador para tarefas de conectividade.

2.2.4 **Protocolo LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)**

O sistema de comunicação *LoRaWAN (Long Range Wide Area Network)* é um protocolo de rede de baixa potência que permite a comunicação sem fio entre dispositivos operados por bateria, por conta da sua imensa eficiência energética (SANCHEZ, 2021). Ele é otimizado para aplicações que exigem comunicação bidirecional, segurança de ponta a ponta e suporte a serviços de mobilidade e localização.

Figura 1 – Arquitetura de comunicação LoRaWAN



Fonte: Alliance (2025)

O LoRaWAN utiliza a tecnologia LoRa (Long Range), que opera em um espectro de radiofrequência sem licença e é reconhecido como um padrão internacional para redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) (ALLIANCE, 2025). A Figura 1 mostra a arquitetura desse sistema de comunicação, estruturada em camadas e servidores para garantir a troca de informações. Os dispositivos enviam dados por meio da camada física *LoRa* até um *gateway*, que encaminha essas informações para um servidor de rede. No nosso caso, o *gateway* é representado por um sistema receptor na residência do agricultor rural. Este servidor gerencia a comunicação e pode interagir com servidores externos, encarregados de processar e enviar informações ao banco de dados remoto.

2.2.5 Grafana: A Plataforma de Visualização

O *Grafana* é uma plataforma de código aberto amplamente utilizada para visualização e análise de dados, permitindo a criação de *dashboards* dinâmicos e interativos (GRAFANA LABS, 2025). Para este projeto, sua adoção como camada de *frontend* (visualização) foi uma decisão estratégica alinhada aos requisitos de baixo custo, acessibilidade e usabilidade. Primeiramente, por ser uma solução *open-source*, o Grafana elimina completamente os custos de licenciamento de software, um fator crucial para a viabilidade econômica da solução. Sua natureza baseada em web permite que seja executado em um simples navegador, tornando-o ideal para rodar em hardware de baixo poder de processamento, como a *TV Box* recuperada, que serve como o terminal de visualização dedicado ao agricultor. Além disso, uma das maiores

vantagens do Grafana é sua flexibilidade de conexão com diversas fontes de dados.

Sua compatibilidade com o Firebase, através de *plugins* da comunidade, foi fundamental para que o *dashboard* consumisse os dados armazenados na nuvem de forma direta e eficiente. Finalmente, a plataforma se especializa em traduzir séries de dados complexas em visualizações claras e acionáveis, como medidores e gráficos de linha. Conforme demonstrado por Gonçalves (2024) e Silva (2024), essa capacidade de visualização interativa é fundamental em projetos de monitoramento, pois transforma dados brutos dos sensores em informação gerencial de fácil interpretação. Dessa forma, o Grafana não é apenas uma ferramenta de exibição, mas um componente central que cumpre os requisitos não funcionais de usabilidade e baixo custo do projeto.

2.2.6 Telegram Bot: O Sistema de Alertas

O Telegram é um serviço de mensagens instantâneas baseado em nuvem, conhecido por seu foco em velocidade, segurança e, crucialmente para desenvolvedores, por uma plataforma de *bots* aberta e extremamente poderosa. Lançado em 2013, o Telegram permite a criação de “robôs” de software, que são contas automatizadas capazes de interagir com usuários, enviar mensagens, receber comandos e se integrar com outros serviços através de sua API (Application Programming Interface) (TELEGRAM, 2025). Esta capacidade de automação transforma o aplicativo de um simples mensageiro em uma plataforma versátil para a entrega de notificações e o controle remoto de sistemas, como o proposto neste trabalho.

Para o projeto “Agricultura Conectada”, a API de *bots* do Telegram foi utilizada para implementar o sistema de alertas proativos. A escolha desta plataforma foi estratégica por sua robustez, pela ausência de custos e pelo fato de ser uma ferramenta de comunicação amplamente utilizada, garantindo que o agricultor não precise instalar um aplicativo adicional para receber as notificações. A solução consiste em um *bot* customizado que atua como uma ponte entre a lógica de controle do sistema e o usuário final. Quando o *firmware* do Gateway detecta que um dado recebido do Nó Sensor ultrapassou um limiar pré-configurado (por exemplo, umidade do solo abaixo de um nível crítico), ele aciona uma função que realiza uma requisição HTTPS para a API do Telegram. Essa requisição instrui o *bot* a enviar uma mensagem de alerta específica para o ID de usuário do agricultor, que foi previamente cadastrado.

Este mecanismo de alerta em tempo real é fundamental para a proposta de valor do projeto. Ele transforma o sistema de uma ferramenta de monitoramento passivo, que exige a consulta ativa do *dashboard*, para um sistema de vigilância ativo, que informa o agricultor sobre problemas iminentes. Isso possibilita uma resposta rápida a eventos adversos, como uma falha na irrigação ou uma seca inesperada, otimizando o manejo, prevenindo perdas e cumprindo o objetivo de fornecer um apoio operacional eficaz.

2.2.7 Firebase: O Backend de Dados em Tempo Real

Lançado inicialmente em 2011 e adquirido pelo Google em 2014, o Firebase atua como uma plataforma de *Backend-as-a-Service* (BaaS), simplificando drasticamente a arquitetura de sistemas de IoT como o deste projeto (GOOGLE, 2025). Sua escolha foi motivada pela aceleração do desenvolvimento e pela ausência de custos operacionais na escala proposta. O Firebase oferece SDKs (Software Development Kits) otimizados para microcontroladores como o ESP32, permitindo que o *gateway* envie os dados para a nuvem com poucas linhas de código, abstraindo a complexidade de gerenciar conexões HTTP ou uma API REST própria.

Para o armazenamento, foi utilizado o Firestore, um banco de dados NoSQL do Firebase cuja característica “em tempo real” é crucial para a aplicação: quando um novo dado é persistido, o Firestore notifica automaticamente os clientes conectados, como o *dashboard* do Grafana. Essa arquitetura reativa elimina a necessidade do *dashboard* consultar o banco de dados repetidamente (*polling*), resultando em um sistema mais eficiente e responsivo. Adicionalmente, o modelo de preços da plataforma inclui um generoso nível gratuito (*free tier*) que, para a escala de um agricultor familiar, com um número limitado de sensores, torna o custo operacional do *backend* efetivamente nulo. Portanto, a adoção do Firebase foi uma decisão estratégica que garantiu a escalabilidade, acelerou o desenvolvimento e manteve o custo do sistema em zero, alinhando-se ao objetivo central de criar uma solução acessível.

Outro fator determinante na escolha do Firestore é a flexibilidade na portabilidade dos dados, mitigando riscos de dependência tecnológica excessiva (*vendor lock-in*). Como o banco opera sobre uma estrutura orientada a documentos, a representação dos dados é nativamente compatível com o formato JSON (*JavaScript Object Notation*), padrão universal para intercâmbio de informações na web. Essa característica simplifica significativamente eventuais processos de migração para outras arquiteturas de banco de dados ou a exportação para ferramentas de análise externa.

2.2.8 Programas Utilitários

Ferramentas auxiliares foram utilizadas durante o desenvolvimento e validação do software para depuração, monitoramento e simulação:

- **Monitor Serial:** Ferramenta integrada ao PlatformIO, que permite visualizar os dados enviados pelo ESP32 via comunicação serial durante os testes;
- **Versionamento do Código-Fonte:** A plataforma escolhida para a gerência do código-fonte foi o GitHub, amplamente reconhecida por suas funcionalidades de controle de versão e colaboração em projetos. O GitHub oferece segurança e consistência ao permitir o versionamento do código-fonte, uma ferramenta essencial para equipes de desenvolvimento.

3 MODELAGEM DO PROJETO

A modelagem de software é vital para o desenvolvimento de software, pois organiza os componentes e recursos disponíveis de forma clara. Gonzalez & Almeida (2021) argumentam que a boa modelagem de software reduz riscos, melhora a qualidade do software e acelera o processo de desenvolvimento.

O ponto de partida da modelagem é o levantamento de requisitos, processo no qual são estabelecidas as bases do projeto. Nesta seção, serão documentados os requisitos funcionais, que definem o que o sistema deve fazer, e os requisitos não funcionais, que especificam os atributos de qualidade, como usabilidade e performance.

Uma vez definidos os requisitos, a modelagem avança para o diagrama de caso de usos. Este artefato é essencial para responder à pergunta de que interage com o sistema e com quais objetivos.

Finalmente, para detalhar como essas interações ocorrem na prática, serão apresentados os respectivos diagramas de fluxo. Esta seção irá ilustrar, passo a passo, a sequência de ações e decisões envolvidas nos principais processos, como o monitoramento diário pelo agricultor e a configuração do sistema pelo administrador. Esta estrutura é fundamental para o entendimento completo do projeto, desde a especificação fundamental do sistema até o detalhamento de seus processos operacionais.

3.1 LEVANTAMENTO DE REQUISITOS

O levantamento dos requisitos do sistema concentrou-se na facilidade de acesso aos dados coletados do ambiente pelo produtor rural. Além disso, destacou-se a importância da comunicação entre os microcontroladores e o sistema de armazenamento de dados, garantindo que a plataforma exibisse as informações de forma confiável.

3.1.1 Requisitos Funcionais

- **[RF001]** O sistema deve ser capaz de coletar dados de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e umidade do solo;
- **[RF002]** O sistema deve ser capaz de transmitir os dados coletados através da rede LoRaWAN;
- **[RF003]** O sistema deve armazenar os dados recebidos em um banco de dados;
- **[RF004]** O sistema deve ser capaz de exibir os dados coletados em um painel (dashboard) visual, utilizando gráficos e tabelas;

- **[RF005]** O sistema deve permitir a visualização dos dados em um navegador web padrão, em qualquer dispositivo conectado a internet, incluindo as *TvBox* recuperadas.
- **[RF006]** O sistema deve fornecer um mecanismo de autenticação para garantir que apenas usuários autorizados acessem a plataforma de visualização.
- **[RF007]** O sistema deve permitir que um usuário com perfil de *Administrador* crie e gerencie as credenciais de acesso para os usuários com perfil de *Agricultor*.
- **[RF008]** O sistema deve ser capaz de enviar notificações automáticas (alertas) para o usuário através de um *bot* do Telegram quando os dados dos sensores atingirem limiares críticos pré-definidos.

3.1.2 Requisitos Não Funcionais

- **[RNF001]** O sistema deve ser fácil de usar e configurar para agricultores com pouca experiência em tecnologia;
- **[RNF002]** O sistema deve fornecer informações claras e concisas a respeito das condições atuais do ambiente;
- **[RNF003]** O sistema deve ser capaz de ser expandido para atender às necessidades de um número maior de usuários e sensores;
- **[RNF004]** O sistema deve ser de fácil manutenção, com componentes facilmente substituíveis;
- **[RNF005]** O sistema deve ser capaz de lidar com grandes volumes de dados sem perda de desempenho;
- **[RNF006]** O banco de dados utilizado deve ser capaz de armazenar dados de múltiplos sistemas emissores.

3.2 DIAGRAMA DE CASO DE USOS

Nesse tópico, serão identificados os atores, o *Agricultor* e o *Administrador*, e os principais casos de uso que eles podem executar, agrupando assim os requisitos funcionais em processos de negócio e delimitando as fronteiras do sistema, como detalhado na Figura 2.

3.2.1 Casos de Uso do Ator Agricultor

- **UC01 - Autenticar no Sistema:** Permite ao agricultor realizar o login na plataforma de monitoramento utilizando suas credenciais previamente cadastradas,

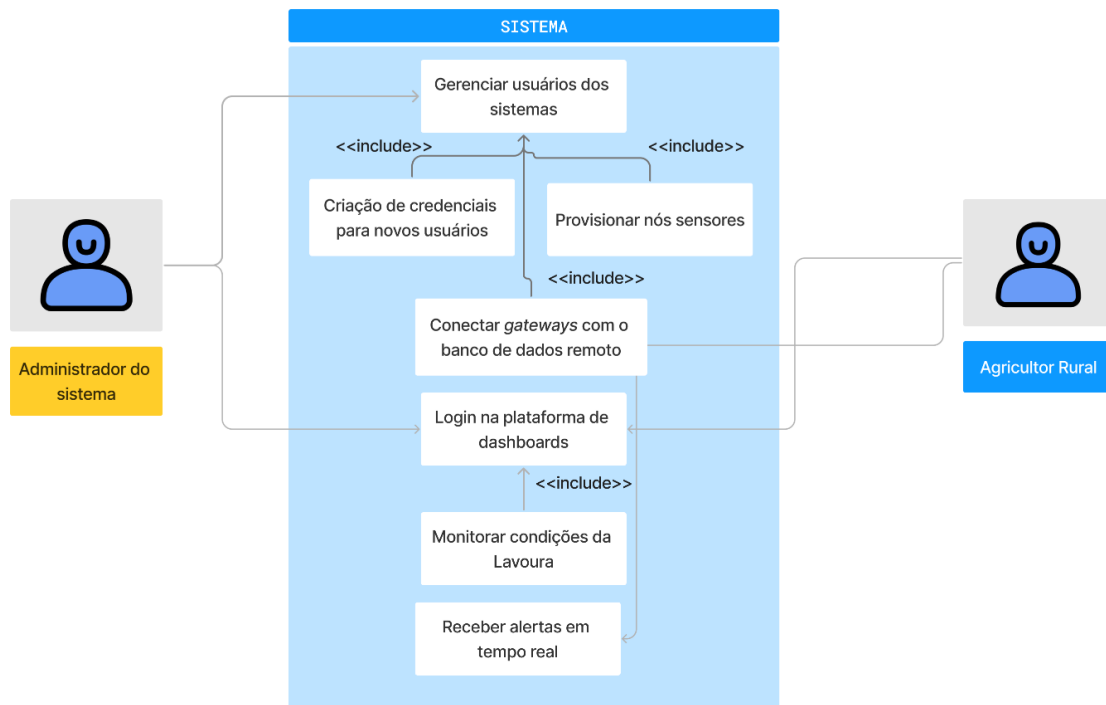
garantindo o acesso seguro e individualizado às suas informações. Este caso de uso é um pré-requisito para o monitoramento dos dados;

- **UC02 - Monitorar Condições da Lavoura:** Representa o principal objetivo do agricultor. Através do dashboard, ele pode visualizar os dados coletados pelos sensores em tempo real e em formato histórico, utilizando gráficos, medidores e tabelas para analisar as condições da plantação e subsidiar suas decisões de manejo e irrigação;
- **UC03 - Receber Alertas de Condições Críticas:** Permite ao agricultor ser notificado de forma proativa em seu dispositivo móvel (via Telegram) sempre que o sistema detectar que uma das variáveis monitoradas atingiu um limiar crítico, possibilitando uma resposta rápida a eventos adversos.

3.2.2 Casos de Uso do Ator Administrador

- **UC04 - Gerenciar Usuários:** Permite ao administrador criar, editar e remover as contas de acesso dos agricultores na plataforma Grafana. Este processo inclui a definição de nome de usuário, senha e a associação do usuário ao seu respectivo dashboard;
- **UC05 - Provisionar nó sensor:** Permite ao administrador registrar e configurar um novo dispositivo de hardware (nó sensor) no sistema. Este processo envolve associar o ID único do novo sensor ao perfil de um agricultor específico, expandindo a capacidade de monitoramento da propriedade.

Figura 2 – Diagrama de casos de uso do sistema



Fonte: Produzido pelo autor

3.3 DIAGRAMA DE FLUXO

Para representar o fluxo de utilização do sistema sob as perspectivas dos diferentes atores envolvidos, foram elaborados dois diagramas de fluxo. O primeiro detalha a experiência do usuário final (o agricultor) durante a operação diária do sistema. O segundo descreve o processo administrativo de configuração e provisionamento de um novo usuário, realizado por um instalador ou administrador do sistema. Juntos, estes diagramas fornecem uma visão holística dos processos operacionais da solução.

3.3.1 Fluxo de Utilização pelo Agricultor

O primeiro diagrama, ilustrado na Figura 3, detalha a jornada do agricultor ao utilizar o sistema para o monitoramento em tempo real de sua lavoura. O fluxo foi projetado para ser simples e direto, exigindo mínima interação técnica do usuário. As etapas são as seguintes:

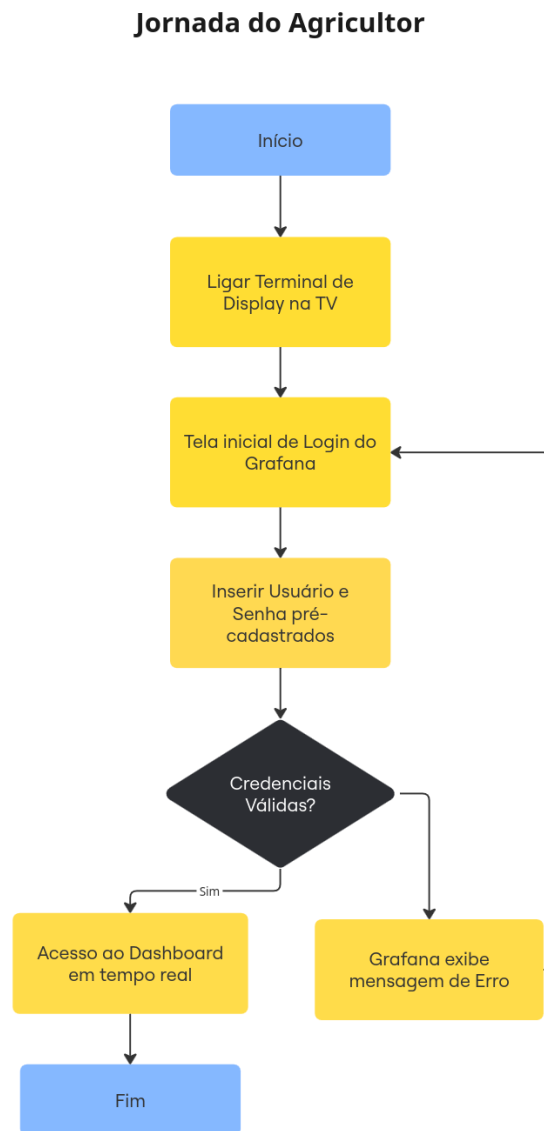
1. O processo inicia-se com a ação do agricultor de ligar o terminal de visualização (*TV Box*), que está conectado a um monitor ou televisor;

2. O sistema operacional da TV Box é carregado e, automaticamente, abre o navegador em modo de tela cheia, exibindo a tela de login da plataforma Grafana;
3. O agricultor insere suas credenciais (usuário e senha) previamente fornecidas;
4. O sistema realiza a validação das credenciais. Em caso de falha, uma mensagem de erro é exibida, e o fluxo retorna à tela de login;
5. Com as credenciais validadas, o sistema carrega e exibe o dashboard principal, apresentando os dados da lavoura (umidade, temperatura, etc.) em tempo real. O agricultor pode, então, monitorar as condições de sua plantação.

Paralelamente à visualização ativa pelo agricultor, o sistema executa um sub-fluxo contínuo de monitoramento e alerta, que opera em segundo plano, conforme detalhado na Figura 4:

- O sistema receptor analisa continuamente os dados recebidos dos sensores;
- Ao detectar que uma medição atingiu um limiar crítico pré-configurado (ex: umidade do solo abaixo de 30%), um gatilho de alerta é acionado;
- O sistema envia uma notificação automática para o agricultor através da API do Telegram;
- O agricultor recebe a mensagem de alerta diretamente em seu celular, permitindo uma ação proativa mesmo sem estar monitorando o dashboard ativamente.

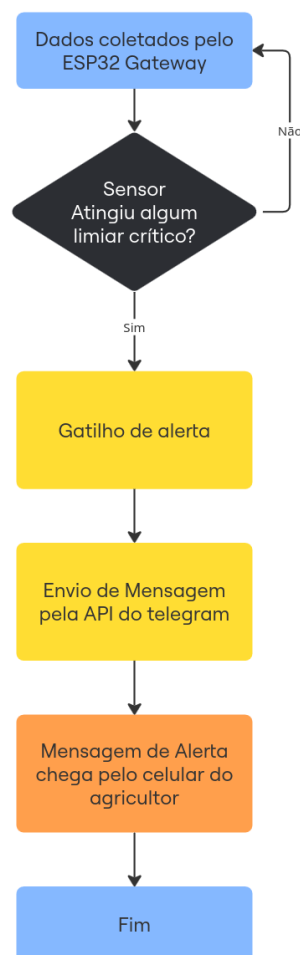
Figura 3 – Jornada do Agricultor



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 4 – Subfluxo de envio de alertas em tempo real

Fluxo de envio de alertas via Telegram



Fonte: Produzido pelo autor

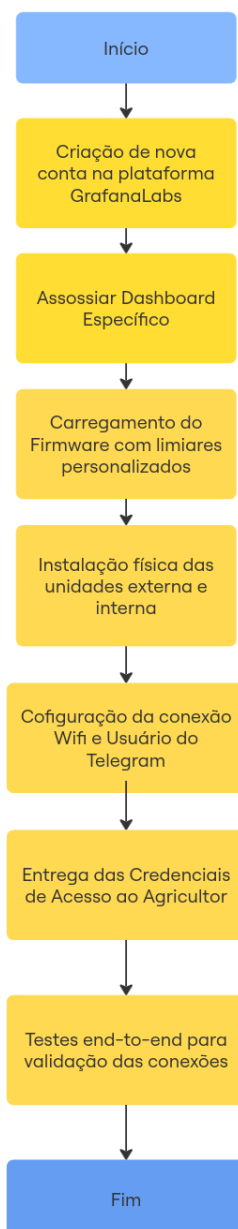
3.3.2 Fluxo de Configuração e Provisionamento

O segundo diagrama, apresentado na Figura 5, descreve o processo administrativo necessário para configurar o sistema para um novo agricultor. Este fluxo é realizado por um usuário com privilégios de administrador. O processo segue as seguintes etapas:

1. O administrador acessa o painel administrativo da plataforma Grafana a partir de um computador;
2. Realiza o cadastro de um novo usuário, definindo um nome de usuário e senha para o agricultor;

3. Associa o novo usuário ao dashboard específico de sua propriedade, configurando as permissões para garantir que ele visualize apenas os seus próprios dados;
4. Acessa o módulo de configuração de alertas do sistema (neste caso, as configurações do bot do Telegram);
5. Vincula o ID de usuário do Telegram do agricultor ao sistema de notificações de sua propriedade;
6. Realiza testes de ponta a ponta para garantir que os dados estão sendo exibidos corretamente no dashboard do novo usuário e que os alertas estão sendo enviados para o destinatário correto;
7. Finalmente, entrega as credenciais de acesso (usuário e senha) ao agricultor, que agora está apto a utilizar o sistema.

Figura 5 – Fluxo de instalação do sistema (Jornada do Administrador)

**Fluxo de instalação do sistema
(Administrador)**

mimo

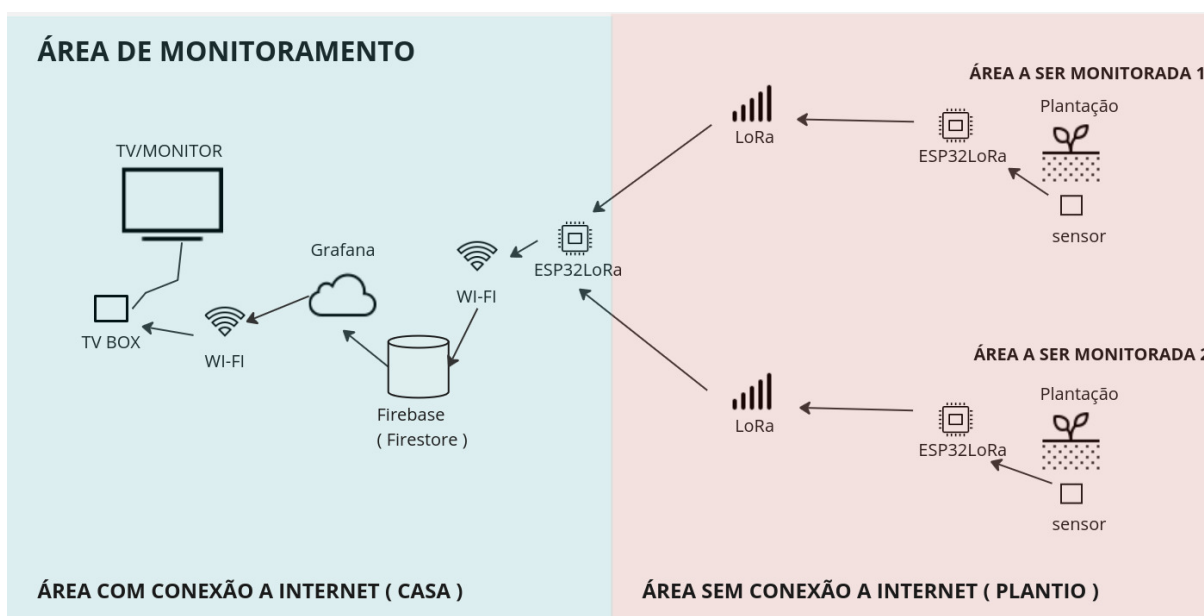
Fonte: Produzido pelo autor

3.4 ARQUITETURA DO SISTEMA

A arquitetura do sistema, mostrada na Figura 6 define que o sistema é dividido em duas partes principais: a casa do agricultor rural e o ambiente externo, a lavoura.

Esses ambientes são caracterizados principalmente pela ausência (ou presença) de conexão à internet.

Figura 6 – Arquitetura de implementação do sistema



Fonte: Produzido pelo autor

Nas áreas sem acesso à internet, a coleta de dados é realizada pelo microcontrolador ESP32 instalado na lavoura. Esse dispositivo captura as informações dos sensores e as transmite para o sistema na casa, assegurando que todos os dados relevantes sejam centralizados e disponibilizados para análise.

Por outro lado, na parte interna da residência do agricultor, existirá um ESP32 conectado à internet. Essa conexão é feita por meio da biblioteca *WiFiConnectionManager*, que transforma o dispositivo em um ponto de acesso, facilmente configurável pelo próprio agricultor. Isso garante que os dados recebidos sejam enviados para o banco de dados remoto, que, por sua vez, é consumido pela plataforma de exibição de dados, o Grafana.

Tendo em vista o exposto acima, nota-se que o fluxo de informações segue um modelo de transmissão de dados híbrido, utilizando os protocolos de comunicação *LoRaWAN* para recebimento dos dados dos sensores, devido ao seu alcance, e requisições *HTTP* entre os serviços de exibição e armazenamento de dados, que estão disponíveis na rede. Dessa forma, é garantida a entrega confiável e rápida dos dados dos sensores entre os dispositivos microcontroladores e o fácil acesso ao *dashboard* de visualização dos dados por qualquer dispositivo conectado à internet.

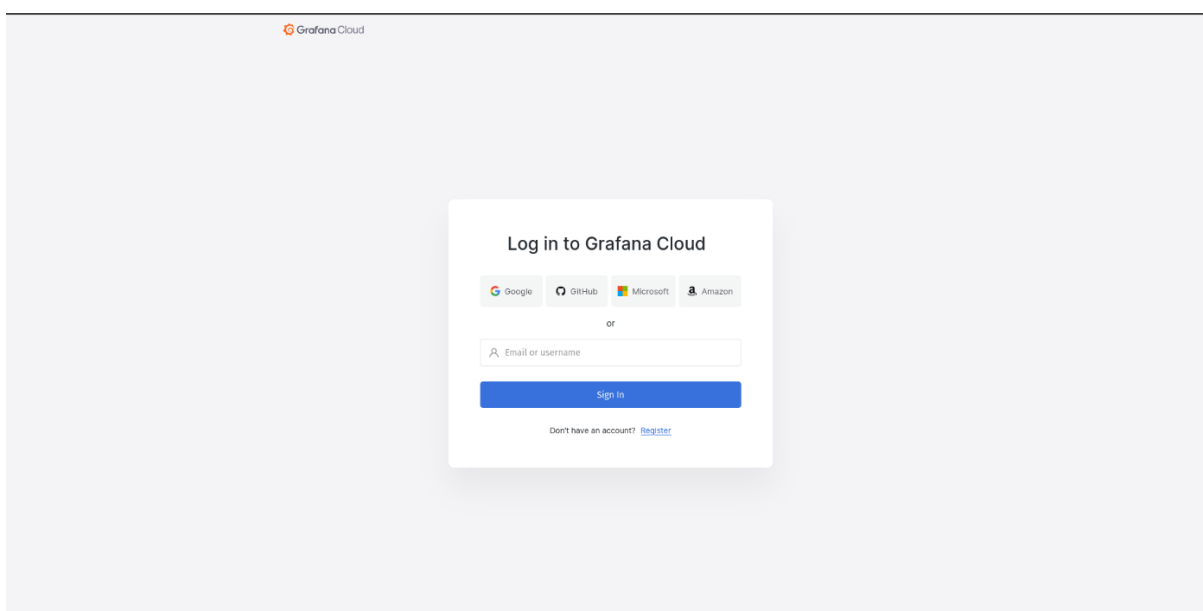
Além disso, observa-se na Figura 6 que a *TV Box* desempenhará o papel de exibir os dados da plataforma de *dashboards* assim que estiver conectada à internet,

cumprindo, dessa forma, o objetivo de integrar a visualização das informações de forma prática e eficiente.

3.5 INTERFACE DE USUÁRIO

A exibição dos dados coletados, como já mencionado, se dá via plataforma de visualização de dados *Grafana*. Para o agricultor rural ter acesso a essa plataforma, é necessário que um conjunto de credenciais seja criado para que o acesso aos *dashboards* criados seja garantido.

Figura 7 – Tela de login da plataforma Grafana Labs



Fonte: GRAFANA LABS (2025)

Ao ligar o televisor conectado à *TvBox*, o agricultor estará visualizando dentro de poucos minutos uma janela do navegador em modo tela-cheia, na qual será orientado a inserir as credenciais previamente criadas via teclado e mouse auxiliares, conforme descrito na Figura 7.

Ao acessar a ferramenta, o usuário conseguirá visualizar os dados coletados pelos sensores por meio de gráficos interativos e tomar decisões baseadas nos dados coletados do ambiente. Durante a criação da disposição visual dos dados coletados, a plataforma oferece diversas opções de agrupamento, conhecidas como painéis, como por exemplo:

1. **Painel de Tabela:** Este painel exibe um histórico detalhado dos dados, incluindo os valores de umidade do solo, umidade do ar e temperatura;

2. **Painéis de Medidores em Barra:** Esses medidores representam visualmente os níveis atuais de umidade do solo, umidade do ar e temperatura, o que facilita a tomada de decisão;
3. **Gráficos de Linha:** Os gráficos de linha das variáveis coletadas apresentam a rastreabilidade da mudança dos seus valores com o tempo.

A escolha dessas ferramentas de visualização permite tomar decisões rápidas em situações críticas, como o mal funcionamento de um sensor, ao identificar problemas de forma imediata e aplicar soluções. Além disso, elas ajudam a acompanhar mudanças graduais, como as variações na umidade do solo, por meio de gráficos que destacam tendências. Dessa forma, o sistema garante respostas eficientes e um planejamento mais preciso, otimizando a gestão dos recursos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados práticos obtidos com a implementação e validação de um protótipo funcional. Os testes foram conduzidos em um ambiente de horta que simula as condições reais de uma pequena produção familiar, permitindo uma avaliação dos requisitos funcionais propostos e da viabilidade da solução. O foco da análise reside na comprovação da arquitetura do sistema e na funcionalidade da plataforma de visualização de dados.

4.1 PESQUISA DE CUSTO

A fim de quantificar a viabilidade econômica e o potencial de alcance social da solução proposta, foi realizada uma análise comparativa de custos entre o protótipo desenvolvido e as soluções comerciais de monitoramento agrícola disponíveis no mercado brasileiro. A pesquisa focou em plataformas que, embora mais complexas, oferecem monitoramento de variáveis agrônômicas, servindo como um parâmetro no mercado de soluções agrícolas de monitoramento. Como exemplo representativo, foi analisada a estrutura de planos da plataforma SENSIX TECNOLOGIA (2025), uma das AgTechs de referência no país.

A análise da Tabela 1 revela uma discrepância radical de custos que valida a premissa central deste trabalho. O custo de hardware do protótipo "Agricultura Conectada", na ordem de R\$ 350,00 por ponto de monitoramento, representa uma redução de aproximadamente 20% em comparação com o preço da mensalidade da alternativa analisada. Esta viabilidade é potencializada pela eliminação de custos recorrentes de software, através do uso de plataformas de código aberto, e pela estratégia de reutilização de eletrônicos, que anula o custo do terminal de visualização.

Este resultado transcende uma simples otimização de custos, ele representa uma mudança de paradigma. Ao substituir o modelo de negócio proprietário e de alta barreira de entrada por um modelo aberto, modular e sustentável, o projeto demonstra um caminho concreto para a inclusão digital do agricultor familiar. A solução não apenas se prova funcional, mas também economicamente viável, cumprindo de forma inequívoca a missão de democratizar o acesso às ferramentas da Agricultura 4.0.

4.2 IMPLEMENTAÇÃO E VALIDAÇÃO DO PROTÓTIPO EM CAMPO

A validação do sistema foi realizada através da instalação do protótipo em um ambiente de produção agrícola simulado, semelhante ao real, conforme detalhado nesta seção. O protótipo foi construído em alinhamento com os pilares do projeto:

Tabela 1 – Análise Comparativa de Custo entre a Solução Proposta e Planos Comerciais.

Componente de Custo	Soluções Comerciais	Projeto "Agricultura Conectada"
Hardware (nó sensor)	Custo de aquisição não divulgado publicamente, vendido sob orçamento e geralmente na casa de milhares de reais.	~R\$ 350,00 por ponto de medição.
Hardware (Terminal de Visualização)	Requer computador ou smartphone do usuário. Custo de tablets dedicados não incluso.	R\$ 0,00 (TV Box Reutilizada)
Software (Plataforma)	Modelo de assinatura (SaaS) com custo recorrente. Planos a partir de R\$ 499,00 por mês (para até 500 hectares).	R\$ 0,00 (Uso de plataformas com plano gratuito)
Modelo de Tecnologia	Proprietário (caixa-preta), com dependência total do fornecedor para manutenção e evolução.	Código aberto, componentes modulares e de fácil manutenção.

Fonte: Produzido pelo autor

baixo custo, sustentabilidade e eficiência. Conforme ilustrado na arquitetura (Figura 6), o sistema é composto pelas unidades detalhadas a seguir.

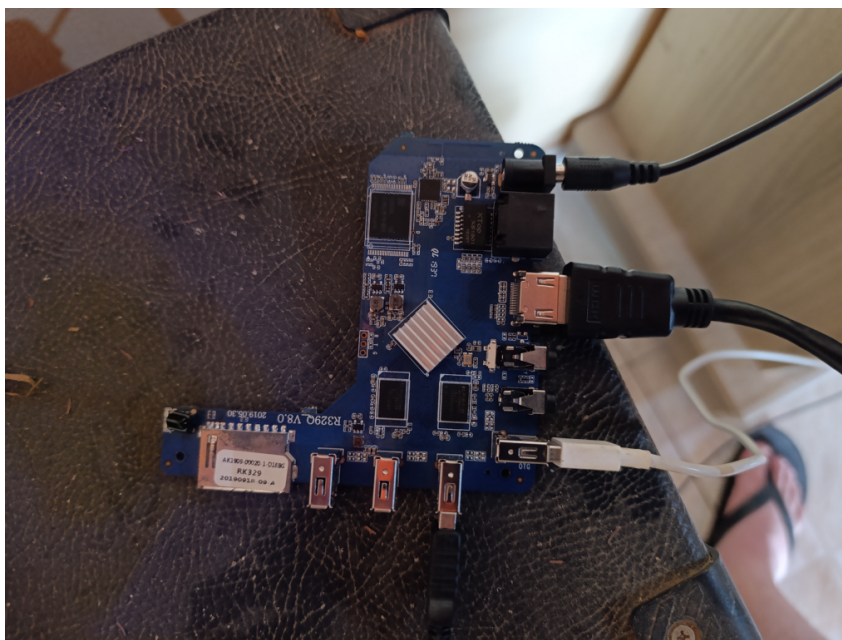
- **Nó sensor:** Unidade de campo composta por um microcontrolador ESP32-LoRa e sensores, conforme detalhado na Figura 8. A alimentação do módulo foi realizada de forma sustentável, utilizando baterias de lítio recuperadas de cigarros eletrônicos descartados;
- **Estação Base (*gateway*):** Unidade receptora, baseada em um segundo ESP32-LoRa, responsável por receber os dados via LoRa e retransmiti-los via Wi-Fi para a plataforma em nuvem;
- **Terminal de Visualização:** Um aparelho **TV Box descaracterizado**, obtido através da parceria com a Receita Federal, foi configurado para exibir o dashboard de monitoramento em uma TV/Monitor convencional, como pode ser visto na Figura 9.

Figura 8 – Nó sensor em detalhe.



Fonte: Produzido pelo autor

Figura 9 – Terminal de visualização (TvBox Reaproveitada).



Fonte: Produzido pelo autor

4.2.1 Estrutura e Validação do Fluxo de Dados

Para comprovar a funcionalidade da arquitetura de ponta a ponta (end-to-end), foi validado o fluxo completo de um dado, desde sua origem no nó sensor, instalado na plantação (Figura 10), até seu armazenamento na plataforma em nuvem. Este processo é a espinha dorsal do sistema de monitoramento, garantindo a integridade e a disponibilidade das informações que alimentarão o *dashboard*.

Figura 10 – Captura de dados da plantação.



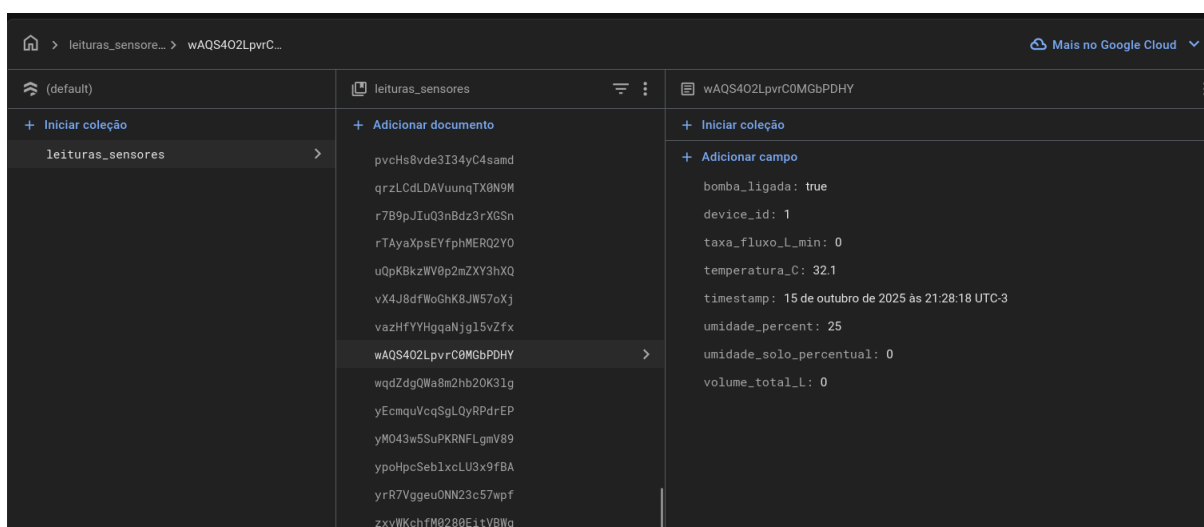
Fonte: Produzido pelo autor

A jornada do dado, ilustrada na arquitetura do sistema (Figura 6), ocorre em três etapas principais:

1. **Coleta e Transmissão (nó sensor):** O *ESP-32* em campo realiza a leitura dos sensores. Os valores são então encapsulados em um pacote de dados binário e transmitidos via rádio LoRa. A validação desta etapa é feita monitorando a saída serial do dispositivo;
2. **Recepção e Persistência (Gateway):** O Gateway, posicionado na residência, recebe o pacote LoRa. Imediatamente, ele se conecta à rede Wi-Fi e utiliza a biblioteca *FirestoreClient* para enviar os dados brutos para o banco de dados Firestore;

3. **Armazenamento na Nuvem (Firebase):** Os dados são recebidos e armazenados no Firebase como um documento em uma coleção. A Figura 11 apresenta um exemplo da estrutura de dados como ela é persistida na nuvem, contendo os campos de cada sensor e um *timestamp*. A visualização destes dados brutos no banco é a prova definitiva de que toda a cadeia de comunicação está operando corretamente.

Figura 11 – Estrutura dos dados brutos armazenados no banco de dados Firestore.



Fonte: Produzido pelo autor

A confirmação de que os dados chegam de forma estruturada ao banco de dados é o principal resultado técnico da fase de implementação. A partir deste ponto, os dados estão prontos para serem consumidos e visualizados pela plataforma *Grafana*.

4.3 RESULTADOS DO MONITORAMENTO EM TEMPO REAL

Com o sistema instalado e operando, foi possível validar a funcionalidade de monitoramento contínuo. A Figura 12 exibe uma fotografia do dashboard construído no Grafana em pleno funcionamento, exibindo os dados coletados diretamente da horta no momento do teste.

A interface apresenta, de forma clara e imediata, os seguintes indicadores:

- **Medidores (Gauges):** Exibem os valores atuais de temperatura e umidade do solo, permitindo uma avaliação rápida do estado da lavoura;
- **Gráfico de Série Temporal:** Registra o histórico das variáveis ao longo do tempo, fundamental para a identificação de tendências e para o planejamento de futuras irrigações.

Figura 12 – Dashboard com dados coletados em tempo real.



Fonte: Produzido pelo autor

A validação no dashboard visual confirma que o sistema é capaz de transformar os dados brutos coletados pelos sensores em informação gerencial acionável, entregando ao usuário uma ferramenta poderosa para a tomada de decisão.

4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados práticos confirmam que o protótipo elaborado é funcional e atende aos objetivos propostos. A implementação bem-sucedida da arquitetura, validada em campo, constitui a principal contribuição deste trabalho.

A escolha de tecnologias e componentes demonstrou-se acertada. O uso da tecnologia de transmissão *LoRaWAN* garantiu a comunicação estável entre o campo e a sede, enquanto a integração entre Firebase e Grafana provou ser uma solução robusta e flexível. A reutilização de dispositivos *TV Box* validou o pilar de baixo custo e sustentabilidade. A solução, ao final, oferece uma ferramenta de alto nível técnico, porém de fácil visualização e instalação, alinhada à realidade do agricultor familiar.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como motivação central o desafio de transpor a barreira tecnológica que distancia a agricultura familiar das inovações da Agricultura 4.0. Partindo da premissa de que a tecnologia pode ser uma ferramenta de inclusão e otimização, o projeto “Agricultura Conectada” se propôs a desenvolver uma solução de monitoramento de irrigação que fosse, simultaneamente, de alto nível técnico e radicalmente acessível.

Ao final do ciclo de desenvolvimento e validação, conclui-se que o objetivo geral do projeto foi plenamente alcançado. Foi demonstrada a viabilidade técnica de uma arquitetura de sistema IoT de baixo custo, cuja principal contribuição reside na integração bem-sucedida de hardware reutilizado, protocolos de comunicação de longo alcance e plataformas de software de código aberto. O protótipo validado em campo provou ser capaz de cumprir seus requisitos funcionais essenciais: coletar dados de sensores, transmiti-los de forma confiável via LoRa, armazená-los na nuvem (Firebase) e apresentá-los de forma intuitiva em um dashboard (Grafana).

A principal contribuição deste trabalho é, portanto, a apresentação de um modelo replicável que pode servir como um caminho concreto para a democratização da agricultura de precisão. Do ponto de vista técnico, oferece uma arquitetura validada e robusta. Do ponto de vista social e econômico, a solução se destaca pela sua sustentabilidade, ao dar um novo propósito a resíduos eletrônicos como TV Boxes e baterias de cigarros eletrônicos, reduzindo drasticamente o custo de entrada para o pequeno produtor.

Naturalmente, como um projeto de escopo acadêmico, o trabalho possui limitações, principalmente a ausência de testes de usabilidade com agricultores e a falta de medições de performance de longo prazo em campo. Essas limitações, contudo, não diminuem a validade da prova de conceito, mas sim pavimentam o caminho para futuras pesquisas e desenvolvimentos. Conforme detalhado no capítulo anterior, a evolução natural do projeto inclui a validação com o público-alvo, o aprimoramento do hardware com sensores mais precisos e, crucialmente, a busca por parcerias estratégicas que possam escalar a solução e maximizar seu impacto social.

Em suma, o presente trabalho demonstrou que é possível utilizar a criatividade e o conhecimento em Análise e Desenvolvimento de Sistemas para criar soluções inovadoras que atendam a demandas sociais urgentes. O projeto não entrega apenas um produto de software e hardware, mas uma prova de que a tecnologia, quando pensada de forma inclusiva e sustentável, pode se tornar uma poderosa ferramenta de empoderamento e desenvolvimento para comunidades essenciais à nossa sociedade.

REFERÊNCIAS

- ALLIANCE, L. **LoRaWAN**. 2025. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://loro-alliance.org/about-lorawan/>. 23
- ARAUJO, F. B. de F.; JUNIOR, O. R. de A.; SANTANA, G. de G. Tecnologias na agricultura 4.0. **Facit Business and Technology Journal**, v. 1, n. 53, 2024. 13
- BOLFE, E. L.; JORGE, L. A. d. C.; SANCHES, I. D. Tendências, desafios e oportunidades da agricultura digital no brasil. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, Tupã, São Paulo, Brasil, v. 7, n. 2, p. 15–36, 2022. Acesso em: 22 jan. 2025. Disponível em: <https://owl.tupa.unesp.br/recodaf/index.php/recodaf/article/view/147>. 14
- CIRCUITO, C. **Sensor de Umidade do Solo - Resistente à Corrosão**. 2025. Acesso em: 25 jan. 2025. Disponível em: <https://curtocircuito.com.br/sensor-de-umidade-do-solo-resistente-a-corrosao.html>. 19
- ELECTRONICS, M. **DHT11 Technical Data Sheet**. 2025. Acesso em: 25 jan. 2025. Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>. 19
- ESCOLA, J. P. L.; FREITAS, J. da S. Sistema de monitoramento de baixo custo para datacenter baseado em internet das coisas. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 65–81, 2020. Acesso em: 26 jan. 2025. 18
- ESPRESSIF SYSTEMS. **ESP32 Datasheet: 2.4 GHz Wi-Fi + Bluetooth + Bluetooth LE SoC**. [S.l.], 2016. Acesso em: 1 dez. de 2025. Disponível em: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf. 17, 20
- FEDERAL, R. **Receita Federal e ABTA destruirão mais de 100 mil aparelhos de TV Box piratas em Resende (RJ)**. 2022. Acesso em 1. dez. 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/receitafederal/pt-br/assuntos/noticias/2022/marco/receita-federal-e-abta-destruicao-mais-de-100-mil-aparelhos-de-tv-box-piratas-em-resende-rj>. 14
- FETAESC. **ANUÁRIO ESTATÍSTICO DA AGRICULTURA FAMILIAR - 2024 / Ano 3**. 2024. <https://www.fetaesc.com.br/noticia/confira-o-anuario-estatistico-da-agricultura-familiar-de-2024>. Acesso em: 18 jan. 2025. 14
- FINISTAO, L. A.; BARBOSA, L. L. da S. Um estudo sobre a linguagem de programação c: Da academia para o mercado de trabalho. In: **Anais do 10º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP**. Sorocaba, SP, Brasil: [s.n.], 2019. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://ocs.ifsp.edu.br/conict/xconict/paper/download/6262/1466>. 20
- FLAMINO, L. G. Inovação e as revoluções na indústria. **Revista Iniciativa Econômica**, v. 8, n. 1/2, 2022. ISSN 2358-5951. Acesso em: 24 out. 2025. Disponível em: <https://periodicos.fclar.unesp.br/iniciativa/article/view/17720>. 13

GONÇALVES, G. d. C. **Grafana como uma ferramenta de visualização de monitoramento de redes de computadores**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) — Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, Brasil, 2024. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://repositorio.pucgoias.edu.br/jspui/handle/123456789/7977>. 24

GONZALEZ, J.; ALMEIDA, P. L. de. **Software Modeling and Design: UML, Use Cases, Patterns, and Software Architectures**. 1st. ed. Berlin, Germany: Springer, 2021. ISBN 978-3-030-12345-6. 26

GOOGLE. **Firebase - Make your app the best it can be with Firebase and generative AI**. 2025. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://firebase.google.com>. 25

GRAFANA LABS. **Grafana**. 2025. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://grafana.com/>. 23, 36

HandsOn Technology. **YF-S201 Hall Effect Water Flow Sensor**. 2025. Acesso em: 01 dez. 2025. Disponível em: <https://handsontec.com/dataspecs/sensor/Water%20Flow%20Sensor.pdf>. 19

HELTEC. **LoRaWAN**. 2025. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: https://docs.heltec.org/en/node/esp32/esp32_general_docs/lorawan/index.html. 22

HELTEC AUTOMATION. **WiFi LoRa 32 V3**. 2025. Acesso em: 26 jan. de 2025. Disponível em: <https://heltec.org/project/wifi-lora-32-v3/>. 17, 18

HERITY, D. C++ in embedded systems: Myth and reality. **Embedded Systems Programming**, San Francisco, CA: Miller Freeman Publications, c1988-c2005., v. 11, n. 2, p. 48–71, 1998. 21

KAMAL, R. **Embedded Systems: Architecture, Programming, and Design**. 2nd. ed. New York: McGraw Hill, 2009. 17

KHAN, W. Z. *et al.* Edge computing: A survey. **Future Generation Computer Systems**, v. 97, p. 219–235, 2019. ISSN 0167-739X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18319903>. 17

LAURETT, R. **Desenvolvimento sustentável na agricultura: antecedentes, barreiras e consequências**. Tese (Doutorado) — Universidade da Beira Interior (Portugal), 2020. 14

LOPES, V. A. S. **Uma proposta de computadores de baixo custo utilizando tv boxes apreendidas**. 44 p. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceará, Quixadá, 2023. Graduação em Engenharia de Software. 15

MOBIZT. **FirebaseClient**. 2025. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://github.com/mobizt/FirebaseClient?tab=readme-ov-file>. 22

PLATFORMIO. **PlatformIO Documentation**. [S.l.], 2025. Acesso em: 01 dez. 2025. Disponível em: <https://docs.platformio.org/en/latest/>. Acesso em: 01 dez. 2025. 20

ROBERTSONE, G.; LAPINA, I. Digital transformation as a catalyst for sustainability and open innovation. **Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity**, Elsevier, v. 9, n. 1, p. 100017, 2023. 13

ROCKSHIP. **RK3229 Datasheet V1.2**. [S.l.], 2016. Acesso em: 1 dez. 2025. Disponível em: <https://rockchip.fr/RK3229%20datasheet%20V1.2.pdf>. 18

SABO, S.; UMARU, A. M.; YUSUF, L. A. Smart iot-based broiler room controller: Design, implementation, performance evaluation, and optimization. **Journal of Science and Technology**, v. 30, n. 2, 2025. 20

SANCHEZ, E. B. **Um estudo de consumo de energia de LoRaWAN**. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação)) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/42031>. 22

SANYAOLU, M.; SADOWSKI, A. The role of precision agriculture technologies in enhancing sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 16, n. 6668, 2024. Acesso em: 18 jan. 2025. 13

SENSIX TECNOLOGIA. **Planos e Preços**. 2025. Acesso em: 24. out 2025. Disponível em: <https://sensix.ag/planos/>. 38

SILVA, M. Gonzaga da *et al.* Desafios e oportunidades para a irrigação na agricultura familiar. **Revista do LabDGE - UFF**, v. 1, n. 2, p. 1–21, 5 2024. 14

SILVA, W. J. d. **Implementação de monitoramento de rede de dados com Zabbix e Grafana: Um estudo de caso**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Faculdade de Tecnologia Ministro Ralph Biasi, Brasil, 2024. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/26453/1/monitoramentoredeferramentazabbix.pdf>. 24

SINDIRECEITA. **Projeto Além do Horizonte da Receita Federal destina minicomputadores originados de TV Box piratas a instituições de ensino de todo país**. 2022. Acesso em: 01 dez. 2025. Disponível em: <https://sindireceita.org.br/noticias/2022/06/27/projeto-alem-do-horizonte-da-receita-federal-destina-minicomputadores-originados-de-tv-box-piratas>. 15

STROPARO, T. R. Transformação digital na agricultura: Impactos da internet das coisas (iot) na eficiência produtiva e sustentabilidade. **Lumen et Virtus**, v. 15, n. 38, p. 1573–1581, 2024. 13

TELEGRAM. **Telegram Bot API**. 2025. Acesso em: 01 dez. 2025. Disponível em: <https://core.telegram.org/bots/api>. 24

TZAPU. **WiFiManager: ESP8266 WiFi Connection Manager**. 2025. Acesso em: 26 jan. 2025. Disponível em: <https://github.com/tzapu/WiFiManager?tab=readme-ov-file>. 21

VIANA, N. C. R. T. *et al.* Inovação na indústria agrícola brasileira: tecnologias de agricultura de precisão. **International Journal of Scientific Management and Tourism**, v. 10, n. 6, p. e1197–e1197, 2024. 13