**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA**

**SETOR DE ENGENHARIAS, CIÊNCIAS AGRÁRIAS E DE TECNOLOGIA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO APLICADA**

**DANILO CARNEIRO CHRISTENSEN**

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTEGRADO PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS AGRÍCOLAS UTILIZANDO SENSORES E APLICATIVO MÓVEL

**PONTA GROSSA**

**2026**

**DANILO CARNEIRO CHRISTENSEN**

# DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTEGRADO PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS AGRÍCOLAS UTILIZANDO SENSORES E APLICATIVO MÓVEL

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada na área de Computação para Tecnologias em Agricultura.

Orientação: Prof. Dr. Zito Palhano da Fonseca

Coorientação: Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca

**PONTA GROSSA**

**2026**

Christensen, Danilo Carneiro
C554 Desenvolvimento de um sistema integrado para coleta e análise de dados agrícolas utilizando sensores e aplicativo móvel / Danilo Carneiro Christensen. Ponta Grossa, 2026.
87 f.

Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada - Área de Concentração: Computação para Tecnologias em Agricultura), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Zito Palhano da Fonseca.
Coorientador: Prof. Dr. Adriel Ferreira da Fonseca.

1. Internet das coisas. 2. Agricultura de precisão. 3. Computação móvel. 4. Sensores de solo. 5. Offline-first. I. Fonseca, Zito Palhano da. II. Fonseca, Adriel Ferreira da. III. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Computação para Tecnologias em Agricultura. IV.T.

CDD: 005.3

Ficha catalográfica elaborada por Maria Luzia Fernandes Bertholino dos Santos- CRB9/986

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
Av. General Carlos Cavalcanti, 4748 - Bairro Uvaranas - CEP 84030-900 - Ponta Grossa - PR - https://uepg.br

# TERMO

## DE APROVAÇÃO

**Danilo Carneiro Christensen**

**“DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA INTEGRADO PARA COLETA E ANÁLISE DE DADOS AGRÍCOLAS UTILIZANDO SENSORES E APLICATIVO MÓVEL”**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Zito Palhano da Fonseca (PPGCA/UEPG)

Prof. Dr. Jonathan de Matos (PPGCA/UEPG)

Prof. Dr. André Eugenio Lazzaretti (CPGEI/UTFPR-CT)

Ponta Grossa, 23 de setembro de 2026.

Documento assinado eletronicamente por **Zito Palhano da Fonseca**, **Professor(a)**, em 30/09/2026, às 14:00, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

Documento assinado eletronicamente por **Andre Eugenio Lazzaretti**, **Usuário Externo**, em 30/09/2026, às 14:20, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

Documento assinado eletronicamente por **Jonathan de Matos**, **Professor(a)**, em 30/09/2026, às 15:46, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.

A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.uepg.br/autenticidade informando o código verificador **3311327** e o código CRC **68DA1A94**.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por tudo. Por me conceder o dom da vida, a saúde, a resiliência para superar os obstáculos e a força necessária para chegar a esta etapa tão importante da minha jornada.

À minha família, meu alicerce. Aos meus pais, à minha esposa e aos meus sogros, expresso minha mais profunda e sincera gratidão. Obrigado por sempre estarem ao meu lado, por compreenderem as minhas ausências, por acreditarem em mim mesmo quando as dúvidas surgiam e por serem o meu porto seguro constante.

Aos meus amigos e colegas, agradeço por tornarem essa caminhada mais leve. Seja por uma palavra de incentivo nas horas difíceis, por um conselho de conforto ou pelas risadas e brincadeiras que trouxeram o equilíbrio necessário para a minha saúde mental durante a pesquisa.

Aos meus professores, pelos ensinamentos e dedicação com que contribuíram para a minha formação em Computação Aplicada. Em especial, agradeço ao meu orientador, Prof. Zito Palhano da Fonseca, pela confiança e paciência em diversos momentos durante esta trajetória.

Agradeço à CAPES – Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – pela concessão de bolsas de estudo.

## RESUMO

A agricultura brasileira enfrenta o desafio de aumentar a eficiência produtiva e a sustentabilidade, demandando cada vez mais a adoção de tecnologias de Agricultura de Precisão. No entanto, a coleta de dados em campo para pesquisa agrícola ainda esbarra em métodos manuais onerosos e na falta de conectividade em áreas rurais. Este trabalho propõe o desenvolvimento e validação de um sistema integrado de baixo custo para a coleta, armazenamento e análise de dados agronômicos georreferenciados. A solução é composta por um protótipo de hardware baseado no microcontrolador ESP32, equipado com sensores para monitoramento de pH, condutividade elétrica (CE), macronutrientes (NPK), temperatura e umidade (do solo e do ar), além de um módulo GPS para registro da localização geográfica exata das coletas. O sistema opera integrado a um aplicativo móvel multiplataforma, desenvolvido com a arquitetura *Clean Architecture* e padrão MVVM, que utiliza estratégia *offline-first* com banco de dados local *SQLite* e sincronização posterior para o *Google Cloud Firestore*, garantindo funcionalidade em áreas sem cobertura de internet. A metodologia incluiu o desenvolvimento dos artefatos e uma rigorosa validação experimental em bancada. Os resultados demonstraram a eficácia do sistema: o sensor de CE apresentou alta linearidade ($R^2 > 0,99$) frente a soluções padrão, e o sensor de pH atingiu acurácia satisfatória após a implementação de um algoritmo de calibração de dois pontos no firmware. Testes em matriz inerte (areia de quartzo) validaram a robustez do sistema, confirmando que a variação de umidade não gera falsos positivos na leitura de nutrientes. No entanto, ensaios de estresse salino expuseram limitações do algoritmo inferencial do equipamento, que superestima as leituras de NPK em ambientes de alta condutividade elétrica não nutricional. Conclui-se que a arquitetura desenvolvida atende aos requisitos de governança de dados, baixo custo e usabilidade, oferecendo uma ferramenta tecnológica validada para democratizar o monitoramento espacial e temporal na pesquisa agrícola aplicada.



**Palavras-chave:** Internet das Coisas; Agricultura de Precisão; Computação Móvel; Sensores de Solo; Offline-first.

## ABSTRACT

Brazilian agriculture faces the challenge of increasing productive efficiency and sustainability, increasingly demanding the adoption of Precision Agriculture technologies. However, data collection in the field for agricultural research still encounters obstacles such as costly manual methods and lack of connectivity in rural areas. This work proposes the development and validation of a low-cost integrated system for the collection, storage, and analysis of georeferenced agronomic data. The solution consists of a hardware prototype based on the ESP32 microcontroller, equipped with sensors for monitoring pH, electrical conductivity (EC), macronutrients (NPK), temperature and humidity (soil and air), as well as a GPS module for recording the exact geographic location of data collection. The system operates integrated with a cross-platform mobile application developed using Clean Architecture and the MVVM pattern, utilizing an offline-first strategy with a local SQLite database and subsequent synchronization to Google Cloud Firestore, ensuring functionality in areas without internet coverage. The methodology included the development of artifacts and rigorous experimental bench validation. The results demonstrated the system's effectiveness: the EC sensor showed high linearity ($R^2 > 0.99$) against standard solutions, and the pH sensor achieved satisfactory accuracy after implementing a two-point calibration algorithm in the firmware. Tests in an inert matrix (quartz sand) validated the system's robustness, confirming that humidity variation does not generate false positives in nutrient readings. However, saline stress tests exposed limitations in the equipment's inferential algorithm, which overestimates NPK readings in environments with high non-nutritional electrical conductivity. It is concluded that the developed architecture meets the requirements of data governance, low cost, and usability, offering a validated technological tool to democratize spatial and temporal monitoring in applied agricultural research.



**Keywords:** Internet of Things; Precision Agriculture; Mobile Computing; Soil Sensors; Offline-first.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quadro de dados enviado pelo cliente. ..... 18
Figura 2 - Quadro de dados enviado pelo servidor. ..... 19
Figura 3 - Camadas da *Clean Architecture* ..... 21
Figura 4 - Fluxograma da Arquitetura Offline-First ..... 23
Figura 5 - Fluxograma da comunicação dos dados. ..... 30
Figura 6 - Fluxograma das ações do usuário ao utilizar o sistema ..... 30
Figura 7 - Modelagem do circuito do primeiro módulo. ..... 34
Figura 8 - Diagrama de relações entre as camadas ..... 37
Figura 9 - Figura 9 - Diagrama de relações entre as coleções do banco de dado ..... 39
Figura 10 - Montagem do teste de validação de pH em bancada ..... 41
Figura 11 – Leitura da Solução Ácida ..... 41
Figura 12 - Bancada para o ensaio de Condutividade Elétrica ..... 42
Figura 13 - Cloreto de Potássio P.A. ..... 43
Figura 14 - Bancada experimental com areia de quartzo e água desmineralizada ..... 44
Figura 15 - Execução do protocolo de caracterização com sensor inserido na matriz úmida ..... 45
Figura 16 - Gráfico da Relação Linear entre Condutividade Teórica e Leitura Média do Sensor ..... 50
Figura 17 - Correlação Física - Umidade vs Condutividade Elétrica ..... 53
Figura 18 – *Pop-up* para conexão BLE ..... 60
Figura 19 - Tela Realizar Coleta ..... 60
Figura 20 – Tela de Sincronização dos Dados ..... 62
Figura 21 - Dashboard da pesquisa ..... 63
Figura 22 – Gráfico de Comparação Variável Específica entre Parcelas ..... 63
Figura 23 – Interface de calibração do sensor por perfil de solo ..... 64
Figura 24 - Tela de Autenticação ..... 76
Figura 25 - Menu Lateral ..... 76
Figura 26 - Tela de Listagem de Pesquisas ..... 77
Figura 27 - Tela de Listagem de Parcelas ..... 77
Figura 28 - Tela de Criar/Editar Parcela ..... 78
Figura 29 - Tela de Listar Leituras de Parcela ..... 78
Figura 30 - Tela de Listagem Tipos de Solo ..... 79
Figura 31 - Tela de Listar Produtos ..... 79
Figura 32 - Tela de Listar Usuários "Aluno" ..... 80
Figura 33 - Tela de Editar Usuário "Aluno" ..... 80
Figura 34 - Tela de Exibir Pesquisas e Usuários Associados ..... 81
Figura 35 - Modal para Vincular Usuário "Aluno" ..... 81
Figura 36 - Tela de Sincronização de Dados ..... 82
Figura 37 - Coleção de Pesquisa ..... 83
Figura 38 - Coleção de Parcela ..... 83
Figura 39 - Coleção de Parcela Produto ..... 83
Figura 40 - Coleção de Produto ..... 84
Figura 41 - Coleção de Tipo Solo ..... 84
Figura 42 - Coleção de Parcela Dados Solo ..... 85
Figura 43 - Vista superior do protótipo de hardware montado em placa perfurada (fenolite), exibindo o layout dos componentes principais: (1) ESP32, (2) Módulo GPS NEO-6M, (3)

Sensor DHT11, (4) Conversor RS485, (5) Conversor DC-DC LM2596, (6) Módulo de carregamento TP4056 e (7) Sensor 7 em 1. ..... 86
Figura 44 – Vista inferior da placa, detalhando as conexões soldadas. A imagem destaca a utilização da técnica de barramento para a distribuição das linhas de alimentação (+5V) e Terra (GND). ..... 87
Figura 45 - Protótipo Acondicionado na Caixa Hermética ..... 87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo dos estudos e relevância para o projeto ..... 26
Tabela 2 - Principais palavras-chave utilizadas para levantamento bibliográfico ..... 29
Tabela 3 - Recursos e ferramentas utilizados ..... 29
Tabela 4 – Especificações Técnicas do Microcontrolador ESP32 ..... 31
Tabela 5 - Especificações Técnicas do Sensor Halisense ..... 31
Tabela 6 – Especificações do sensor DHT11 ..... 32
Tabela 7 - Características do Módulo de GPS NEO-6M ..... 33
Tabela 8 - Principais Padrões de Design utilizados no Aplicativo Móvel ..... 37
Tabela 9 - Estrutura de Coleções no Banco de Dados *Firestore* ..... 38
Tabela 10 - Resultados do Teste de pH ..... 49
Tabela 11 - Resultados Teste CE ..... 49
Tabela 12 - Médias das leituras do sensor em função do volume de água em matriz de quartzo ..... 52
Tabela 13 - Detalhamento de Custos do Protótipo de Hardware ..... 56
Tabela 14 - Matriz Comparativa de Custos, Recursos e Implicações Logísticas (Sistemas Comerciais x Protótipo IoT) ..... 58
Tabela 15 - Telas do Aplicativo ..... 65

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC – *Analog-to-Digital Converter* (Conversor Analógico-Digital)

AI – *Artificial Intelligence* (Inteligência Artificial)

AP – Agricultura de Precisão

API – *Application Programming Interface* (Interface de Programação de Aplicações)

APK – *Android Application Pack* (Pacote de Aplicação Android)

ATT – *Attribute Protocol* (Protocolo de Atributos)

ATP – Adenosina Trifosfato

BLE – *Bluetooth Low Energy* (Bluetooth de Baixa Energia)

CE – Condutividade Elétrica

CEP – *Circular Error Probable* (Erro Circular Provável)

ESP32 – Microcontrolador da Espressif Systems

EVI – *Enhanced Vegetation Index* (Índice de Vegetação Melhorado)

GATT – *Generic Attribute Profile* (Perfil de Atributo Genérico)

GPIO – *General-Purpose Input/Output* (Entrada/Saída de Propósito Geral)

GPS – *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)

I2C – *Inter-Integrated Circuit* (Circuito Inter-Integrado)

I2S – *Inter-IC Sound* (Som Inter-IC)

IA – Inteligência Artificial

IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)

ISE – *Ion-Selective Electrodes* (Eletrodos Íon-Seletivos)

LoRa – *Long Range* (Longo Alcance)

MCU – *Microcontroller Unit* (Unidade de Microcontrolador)

MVVM – *Model-View-ViewModel* (Modelo-Visão-VisãoModelo)

NDVI – *Normalized Difference Vegetation Index* (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)

NIR – *Near-Infrared* (Infravermelho Próximo)

NMEA – *National Marine Electronics Association*

NPK – Nitrogênio, Fósforo e Potássio

NTC – *Negative Temperature Coefficient* (Coeficiente de Temperatura Negativo)

PCB – *Printed Circuit Board* (Placa de Circuito Impresso)

PH – Potencial Hidrogeniônico

PWM – *Pulse Width Modulation* (Modulação por Largura de Pulso)

RAM – *Random Access Memory* (Memória de Acesso Aleatório)

RS485 – Padrão de comunicação serial industrial

SBAS – *Satellite-Based Augmentation System* (Sistema de Aumentação Baseado em Satélite)

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SoC – *System on a Chip* (Sistema em um Chip)

SPI – *Serial Peripheral Interface* (Interface Periférica Serial)

SQL – *Structured Query Language* (Linguagem de Consulta Estruturada)

SRAM – *Static Random-Access Memory* (Memória Estática de Acesso Aleatório)

TDR – *Time Domain Reflectometry* (Reflectometria no Domínio do Tempo)

TTFF – *Time to First Fix* (Tempo para Primeira Aquisição)

UART – *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter* (Transmissor-Receptor Assíncrono Universal)

UI – *User Interface* (Interface do Usuário)

UTC – *Coordinated Universal Time* (Tempo Universal Coordenado)

UX – *User Experience* (Experiência do Usuário)

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

**SUMÁRIO**

**1 INTRODUÇÃO ..... 13**
1.1 OBJETIVOS ..... 15
1.2 JUSTIFICATIVA ..... 15
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO ..... 16
**2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ..... 18**
2.1 INSTRUMENTAÇÃO DE BORDA E COMUNICAÇÃO ..... 18
**2.1.1 Influência da Umidade na Resposta do Sensoriamento Eletroquímico ..... 20**
2.2 ENGENHARIA DE SOFTWARE E ISOLAMENTO DE DOMÍNIO ..... 21
2.3 RESILIÊNCIA DE DADOS E PARADIGMA OFFLINE-FIRST ..... 22
**3 REVISÃO DA LITERATURA ..... 24**
3.1 SISTEMAS DE MONITORAMENTO IOT E A DEPENDÊNCIA DE CONECTIVIDADE ..... 24
3.2 VALIDAÇÃO INSTRUMENTAL E HARDWARES DE BAIXO CUSTO EM BORDA ..... 25
3.3 PERSISTÊNCIA LOCAL E ARQUITETURAS DESCONECTADAS ..... 25
3.4 ANÁLISE COMPARATIVA E DIFERENCIAIS DA SOLUÇÃO PROPOSTA ..... 26
**4 METODOLOGIA ..... 28**
4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO ..... 28
4.2 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA ..... 28
**4.2.1 Visão Geral e Módulos ..... 29**
**4.2.2 Protótipo de Hardware: Componentes e Montagem ..... 31**
**4.2.3 Montagem do Protótipo e Encapsulamento ..... 34**
**4.2.4 Aplicativo Móvel: Arquitetura e Desenvolvimento ..... 35**
**4.2.5 Backend em Nuvem: Google Cloud Firestore ..... 37**
4.3 VALIDAÇÃO E TESTES DO SISTEMA ..... 40
**4.3.1 Protocolo de Validação do Sensor de pH ..... 40**
**4.3.2 Protocolo de Validação do Sensor de Condutividade Elétrica (CE) ..... 41**
**4.3.3 Protocolo de Caracterização da Resposta em Função da Umidade ..... 43**
**4.3.4 Protocolo de Interferência Salina ..... 45**
**4.3.5 Protocolo de Validação do Aplicativo Móvel ..... 46**
**5 RESULTADOS E DISCUSSÕES ..... 47**
5.1 PROTOCOLOS DE VALIDAÇÃO ..... 47
5.2 VALIDAÇÃO INSTRUMENTAL ..... 48
**5.2.1 Validação do pH ..... 48**
**5.2.2 Validação do Sensor de CE ..... 49**
**5.2.3 Análise de Resposta à Variação de Umidade em Matriz de Solo ..... 51**
**5.2.4 Teste de Interferência Salina nas Leituras de Nutrientes ..... 53**
5.3 PROTÓTIPO DE HARDWARE: CUSTOS E COMPARAÇÃO COM A LITERATURA ..... 55
**5.3.1 Análise Comparativa de Custos da Solução Proposta ..... 55**
*5.3.1.1 Sondas Estacionárias de Monitoramento Contínuo ..... 56*
*5.3.1.2 Equipamentos Portáteis Manuais ..... 57*
*5.3.1.3 Soluções Portáteis Baseadas em Espectroscopia ..... 57*
*5.3.1.4 Custo Laboratorial de Análise ..... 57*
*5.3.1.5 Solução Proposta ..... 57*

5.4 ESTUDO DE CASO: GOVERNANÇA DE DADOS VIA APLICATIVO MÓVEL ..... 58
**5.4.1 Estudo de Caso Prático ..... 60**
5.5 LIMITAÇÕES DO SISTEMA PROPOSTO E AS IMPLICAÇÕES DO BAIXO CUSTO ..... 66
**5.5.1 Dependência de Compensação via Software (Calibração) ..... 66**
**5.5.2 Tecnologia Galvânica vs. Alta Frequência ..... 66**
**5.5.3 Natureza Indireta da Leitura de Nutrientes ..... 66**
**5.5.4 Implicações Práticas da Estratégia de Baixo Custo ..... 67**
**6 CONCLUSÃO ..... 69**
**REFERÊNCIAS ..... 73**
**APÊNDICE A – TELAS APLICATIVO MÓVEL ..... 76**
**APÊNDICE B – COLEÇÕES PRINCIPAIS NO BANCO DE DADOS FIRESTORE ..... 83**
**APÊNDICE C – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DA MONTAGEM E ENCAPSULAMENTO DO PROTÓTIPO DE HARDWARE ..... 86**

# 1 INTRODUÇÃO

A agricultura desempenha um papel crucial na economia e na sociedade brasileira, sendo um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento do país. Historicamente, tem sido a base da organização produtiva no Brasil, contribuindo significativamente para a segurança alimentar e a geração de divisas. O Brasil se destaca como um dos maiores produtores mundiais de alimentos, como soja, milho, café e carne bovina, desempenhando um papel essencial na segurança alimentar global (Zamberlan; Cavalcanti, 2019; Borges et al., 2018; Souza et al., 2018).

No entanto, o setor agrícola enfrenta desafios crescentes, como os impactos das mudanças climáticas, o uso intensivo dos recursos naturais e a necessidade de aumentar a produtividade de forma sustentável. Para lidar com essas questões, investimentos contínuos em inovação e pesquisa são essenciais. A modernização da agricultura, impulsionada por tecnologias como a agricultura de precisão e a agricultura digital, tem contribuído significativamente para a eficiência e a sustentabilidade da produção agrícola no Brasil. Essas inovações permitem um gerenciamento mais eficaz das lavouras, otimizando o uso de insumos e reduzindo o impacto ambiental (Villafuerte et al., 2018; Guilhoto, 2004).

A agricultura de precisão é uma abordagem inovadora e essencial para a modernização do setor, que permite o monitoramento detalhado das condições do solo e das culturas. Essa metodologia possibilita a tomada de decisões baseadas em dados concretos, resultando em maior produtividade e eficiência econômica (Filho; Cunha, 2015; Artuzo et al., 2017; Melo et al., 2024). Além de melhorar a rentabilidade das culturas, a agricultura de precisão reduz impactos ambientais ao promover o uso racional de recursos naturais, contribuindo para uma produção mais sustentável (Borges et al., 2022).

Neste contexto, a pesquisa científica desempenha um papel fundamental no avanço da agricultura brasileira. Universidades, centros de pesquisa e instituições especializadas desenvolvem tecnologias e métodos que otimizam a produção agrícola, reduzem impactos ambientais e aumentam a eficiência no uso dos recursos. A adoção das tecnologias Internet das Coisas (IoT) e sistemas de monitoramento remoto, tem revolucionado o setor ao permitir a coleta e análise de dados em tempo real, possibilitando decisões mais estratégicas. No entanto, persiste um gargalo que limita o avanço da pesquisa agrícola de campo: a coleta de dados. Métodos tradicionais são frequentemente manuais, de alto custo, e propensos a erros humanos,

o que dificulta a obtenção de dados sistemáticos e com alta frequência, essenciais para a análise de tendências ao longo do tempo (Silva; Silva-Mann, 2020).

Embora a literatura recente apresente avanços significativos no uso de sensores portáteis para a agricultura de precisão, observa-se uma expressiva lacuna computacional no que tange à governança e centralização das informações coletadas em campo. Atualmente, os ecossistemas de monitoramento frequentemente falham na integração de dados, resultando na formação de 'silos de informação', cenários onde as leituras brutas permanecem isoladas e disponíveis apenas para o pesquisador que realizou a coleta física. Essa fragmentação arquitetural inviabiliza o compartilhamento ágil dos dados e compromete a rastreabilidade dos experimentos ao longo do tempo.

Diante deste cenário, a motivação principal deste projeto surge da necessidade de estabelecer uma governança de dados robusta e integrada. Para solucionar essa lacuna, a contribuição central desta pesquisa consiste no desenvolvimento de um ecossistema computacional de baixo custo estruturado em três camadas interconectadas: (i) um protótipo de hardware de borda, baseado no microcontrolador ESP32, para a aquisição *in situ* de variáveis do solo via sensor multiparamétrico (7 em 1); (ii) uma aplicação móvel com arquitetura *offline-first* para a persistência primária e calibração dinâmica embarcada via Bluetooth; e (iii) um *backend* em nuvem para a sincronização assíncrona das informações. O intuito desta solução integrada é atuar de forma complementar — e não substitutiva — às análises laboratoriais certificadas.

Como diferencial tecnológico frente às soluções existentes, a arquitetura do aplicativo móvel foi projetada para superar a simples coleta, garantindo a rastreabilidade do manejo agronômico. O sistema não apenas centraliza as leituras físicas do solo, mas possibilita o vínculo relacional de produtos aplicados em cada parcela experimental, permitindo o registro preciso de datas, dosagens e histórico de manejo. Além disso, a plataforma integra a gestão de equipes de pesquisa e o controle hierárquico de permissões de visualização, democratizando o acesso a ferramentas de precisão e à informação de ponta a ponta.

Para assegurar o rigor metodológico, o escopo de validação deste projeto delimita-se à prova de conceito da arquitetura computacional proposta. A validação instrumental do hardware restringe-se a ensaios controlados em bancada, utilizando soluções de referência certificadas e matrizes físicas inertes (areia de quartzo). Não constitui objetivo deste trabalho a condução de ensaios de campo longitudinais avaliando o desenvolvimento fisiológico de culturas em solos complexos, tampouco a elaboração de modelos preditivos. Dessa forma, o foco central é atestar que todo o fluxo da engenharia de dados, desde a aferição bruta no sensor,

comunicação sem fio, persistência local e sincronização remota, ocorra de forma íntegra, resiliente e precisa.

## 1.1 OBJETIVOS

### Objetivo geral:

Desenvolver e validar um sistema integrado para coleta, armazenamento e análise de dados georreferenciados sobre variáveis do solo e ambiente, visando facilitar a interpretação visual e a comparação entre diferentes parcelas de pesquisa agrícola.

### Objetivos específicos:

Projetar e construir um protótipo de hardware de baixo custo, baseado no microcontrolador ESP32, capaz de aferir de forma integrada as variáveis físico-químicas do solo, os dados ambientais e as coordenadas geográficas.

Modelar e desenvolver uma aplicação móvel multiplataforma com arquitetura *offline-first*, responsável pelo gerenciamento de pesquisas, pela interface de comunicação *bluetooth* com o hardware e por permitir a recalibração dinâmica dos ganhos e offsets do sensor na própria aplicação.

Implementar uma arquitetura de banco de dados distribuída (SQLite local e sincronização em nuvem) capaz de garantir a rastreabilidade do manejo, correlacionando as leituras físicas do solo com as coordenadas geográficas e os produtos aplicados nos talhões.

Implementar um módulo de visualização de dados na aplicação móvel, que traduza os dados brutos coletados em representações gráficas e tabelas, permitindo a análise comparativa entre parcelas.

Validar o protótipo de hardware por meio de testes de bancada com soluções padrão e matrizes de referência, analisando a precisão das leituras e o comportamento das variáveis, e verificar o funcionamento integrado do sistema desenvolvido.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

A análise dos trabalhos correlatos evidência que, embora a adoção de sistemas *IoT* na agricultura seja crescente, persiste uma lacuna em soluções que integrem, de forma coesa e de baixo custo, três elementos essenciais: o hardware de sensoriamento proximal, uma arquitetura

de software móvel robusta com capacidade *offline* e uma funcionalidade de calibração dinâmica por perfil de solo. Sistemas existentes frequentemente focam em apenas um aspecto da solução, apresentam alto custo ou carecem de uma arquitetura de software documentada que garanta manutenibilidade e escalabilidade. É esta lacuna que o presente projeto se propõe a preencher, desenvolvendo um sistema integrado de ponta a ponta que, ao vincular os dados coletados à sua posição geográfica, permitirá análises espaciais detalhadas, otimizando o planejamento agrícola e facilitando a adoção de práticas mais sustentáveis e eficientes.

O desafio de integrar tecnologias no agronegócio frequentemente esbarra na adoção de arquiteturas de *software* monolíticas, que dificultam a manutenção e a evolução contínua. Portanto, a contribuição tecnológica deste trabalho reside na concepção de uma arquitetura de sistema móvel altamente desacoplada, fundamentada nos princípios SOLID e na *Clean Architecture*. Ao isolar as regras de negócio na camada de domínio, o sistema garante que a lógica de processamento dos dados agronômicos permaneça independente de *frameworks* de interface gráfica ou de detalhes de infraestrutura. Isso assegura que eventuais substituições na camada de hardware ou na infraestrutura de nuvem possam ser realizadas de forma modular, sem a necessidade de reescrever o *core* do aplicativo.

Além disso, a estratégia *offline-first* resolve um problema comum na pesquisa de campo: a intermitência de conectividade em áreas rurais. Ao priorizar a persistência local em um banco de dados *SQLite* embarcado e utilizar a rede remota como mecanismo secundário de sincronização, a solução garante resiliência e continuidade operacional plena durante as etapas de coleta.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para materializar a proposta deste estudo e facilitar a compreensão do percurso metodológico e técnico, o documento está organizado em seis capítulos principais.

O Capítulo 1 introduz o contexto da pesquisa, delimitando o problema da fragmentação de dados agrícolas, os objetivos e a justificativa para o desenvolvimento do ecossistema proposto.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica, embasando os protocolos de instrumentação e comunicação na borda (Modbus RTU e BLE), as estratégias de persistência de dados e os princípios de design de software que garantem a robustez da solução.

No Capítulo 3, é conduzida a revisão da literatura, mapeando os trabalhos correlatos para evidenciar as lacunas tecnológicas referentes à dependência de conectividade e demonstrando os diferenciais da arquitetura desenvolvida.

O Capítulo 4 detalha a metodologia aplicada, descrevendo de ponta a ponta a engenharia do protótipo de hardware, o desenvolvimento do aplicativo móvel sob o padrão *Offline-First* e o delineamento dos protocolos de testes instrumentais.

Em seguida, o Capítulo 5 expõe os resultados e discussões, atestando a eficácia do sistema por meio de ensaios de bancada. Este capítulo também apresenta o estudo de caso prático focado na governança de dados e uma análise crítica de viabilidade financeira frente às alternativas de mercado.

Por fim, o Capítulo 6 consolida as conclusões, verificando o atendimento aos objetivos estabelecidos e apontando perspectivas arquiteturais e agronômicas para evoluções futuras do sistema.

# 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A concepção de sistemas integrados para a Agricultura de Precisão exige a convergência de protocolos industriais de alto nível e arquiteturas de *software* rigorosas. Diferentemente de protótipos de prova de conceito, que frequentemente recorrem a soluções *ad hoc* ou implementações não estruturadas, o ecossistema agrícola opera em ambientes com severas restrições de conectividade e energia. Esse cenário demanda a adoção de metodologias sólidas e o abandono de arquiteturas improvisadas. Este capítulo sintetiza os fundamentos de comunicação na borda e os padrões de engenharia de *software* que garantem a escalabilidade e a manutenibilidade do ecossistema proposto.

## 2.1 INSTRUMENTAÇÃO DE BORDA E COMUNICAÇÃO

A instrumentação de campo depende da integridade no fluxo de dados entre os sensores físicos e a unidade de processamento central, operando frequentemente em ambientes suscetíveis a ruídos eletromagnéticos. Nesse contexto, a robustez é assegurada pela interface serial RS485, que oferece comunicação diferencial amplamente validada em cenários rurais e industriais. Sobre esta camada física, o protocolo Modbus RTU orquestra as transações em um modelo cliente-servidor por meio de quadros de dados padronizados — compostos por endereço, função, dados e verificação de redundância cíclica (CRC) —, garantindo a extração precisa e imune a falhas das variáveis físico-químicas do solo. As

Figuras 1 e 2 ilustram a estrutura de blocos de bytes típica de uma requisição e resposta sob este protocolo.

**Figura 1** - Quadro de dados enviado pelo cliente.

| Address | Function Code | Start Address (Hi) | Start Address (Lo) | Number of Points (Hi) | Number of Points (Lo) | Error Check (Lo) | Error Check (Hi) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0x01 | 0x03 | 0x00 | 0x00 | 0x00 | 0x07 | 0x04 | 0x08 |

Fonte: Manual do sensor Halisense TH-EC-PH-NPK.

**Figura 2** - Quadro de dados enviado pelo servidor.

| Address | Function Code | Number of byte | humidity | temperature | conductivity | PH | N | P | K | Error Check (Lo) | Error Check (Hi) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0x01 | 0x03 | 0x0E | 0x01<br>0xD0 | 0x01<br>0x4C | 0x00<br>0x2C | 0x00<br>0x5A | 0x00<br>0x20 | 0x00<br>0x58 | 0x00<br>0x68 | 0x70 | 0x29 |

Fonte: Manual do sensor Halisense TH-EC-PH-NPK.

Para a integração com dispositivos móveis, a comunicação sem fio é regida pelo padrão *Bluetooth Low Energy* (BLE). O BLE otimiza o uso do espectro e reduz drasticamente o consumo energético, sendo viabilizado pelo Perfil de Atributo Genérico (GATT), que organiza os dados em uma hierarquia lógica de Serviços e Características. Esta topologia permite operações de leitura, escrita e notificação em tempo real, premissas essenciais para o controle bidirecional e a calibração dinâmica do sistema.

Adicionalmente, a acurácia da instrumentação em borda é suscetível a variações físicas e químicas da matriz analisada, exigindo ajustes matemáticos aplicados às leituras eletroquímicas brutas. Para mitigar esses desvios, o método mais eficiente em sistemas embarcados é a calibração linear, cuja relação entre a leitura bruta do sensor (X) e o valor final corrigido (Y) é descrita pela Equação 1.

$$Y = A \cdot X + B \quad (1)$$

Neste modelo matemático, o parâmetro A representa o fator de correção ou ganho (alterando a inclinação da curva de leitura), enquanto o parâmetro B representa o deslocamento ou *offset* (movendo o ponto zero da leitura).

Em arquiteturas modernas de instrumentação, os parâmetros A e B não precisam ser processados exclusivamente via software externo. Sensores inteligentes que operam com o protocolo Modbus RTU possuem registradores internos específicos para armazenar essas constantes. Isso permite que sistemas de controle reescrevam esses valores em tempo real enviando quadros de escrita (*write registers*), viabilizando a calibração dinâmica do hardware na borda para adaptá-lo a solos com características físico-químicas diversas.

### 2.1.1 Influência da Umidade na Resposta do Sensoriamento Eletroquímico

A resposta de sensores eletroquímicos empregados no monitoramento do solo é influenciada não apenas pela concentração de espécies iônicas presentes na matriz, mas também pelas condições físicas do meio em que a medição é realizada. Entre essas condições, o teor de água exerce papel relevante, uma vez que a presença de uma fase líquida favorece a mobilidade dos íons e modifica as características elétricas do meio analisado. Consequentemente, alterações na umidade podem provocar variações na condutividade elétrica (CE), mesmo quando a quantidade de nutrientes presentes no meio permanece constante.

Essa característica é particularmente relevante para sensores multiparamétricos de baixo custo cujas estimativas de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) são obtidas por algoritmos inferenciais associados à resposta elétrica do meio. Nesses sistemas, uma alteração na CE pode ser interpretada pelo algoritmo interno como uma alteração na concentração de nutrientes, ainda que a variação observada decorra, total ou parcialmente, das condições físicas da matriz. Dessa forma, a calibração de um sensor para um determinado perfil de solo pode apresentar dependência das condições de umidade nas quais a calibração e a medição são realizadas.

Nesse contexto, uma abordagem de calibração mais abrangente pode considerar a umidade como uma variável auxiliar na interpretação da resposta do sensor. Em uma formulação simplificada, a estimativa de nutrientes poderia ser representada por uma função dependente da condutividade elétrica e do teor de água, de acordo com a Equação 2.

$$NPK_{estimado} = f(CE, U) \tag{2}$$

em que (CE) representa a condutividade elétrica medida pelo sensor e (U) representa o teor de umidade da matriz. Essa relação não implica necessariamente uma proporcionalidade linear entre as variáveis, podendo assumir diferentes formas matemáticas de acordo com os dados experimentais obtidos durante a calibração, tais como modelos lineares, regressões multivariadas ou outras funções de ajuste.

A utilização da umidade como variável de compensação pode, portanto, permitir que diferentes condições hídricas de um mesmo perfil de solo sejam consideradas durante a interpretação dos dados, reduzindo a possibilidade de atribuir exclusivamente à variação nutricional alterações que também estejam associadas ao estado físico do meio. Entretanto, a determinação da forma matemática adequada dessa compensação depende de estudos

experimentais específicos, com amostras de solo contendo concentrações conhecidas de nutrientes submetidas a diferentes níveis de umidade.

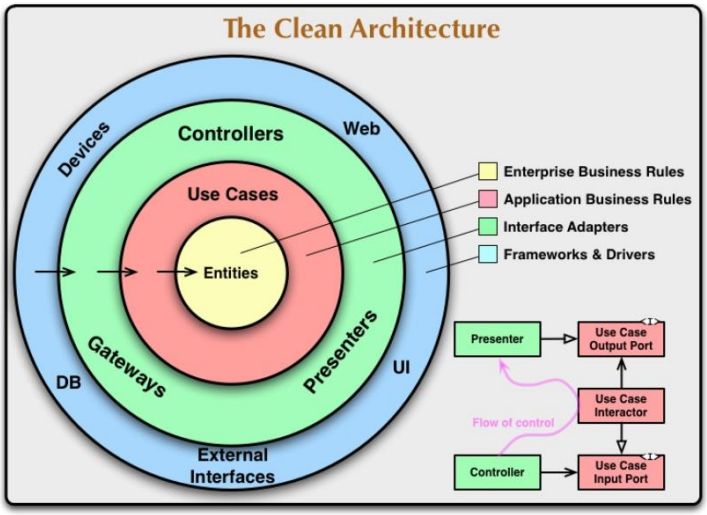
No contexto deste trabalho, essa hipótese é explorada de forma preliminar por meio da caracterização da resposta do sensor à variação controlada da umidade em uma matriz inerte. O objetivo desse ensaio foi separar o efeito físico da presença de água das alterações decorrentes da composição química do solo, permitindo observar o comportamento da CE e das leituras inferenciais de nutrientes em condições controladas.

## 2.2 ENGENHARIA DE SOFTWARE E ISOLAMENTO DE DOMÍNIO

Em ecossistemas IoT complexos, abordagens de código fortemente acopladas tornam-se rapidamente insustentáveis, dificultando a integração de novos sensores ou a migração de provedores de nuvem. Por essa razão, a presente pesquisa refuta o uso de arquiteturas frágeis, fundamentando-se na adoção de uma engenharia estritamente estruturada, orientada a Padrões de Projeto (*Design Patterns*) e aos preceitos do *Domain-Driven Design* (DDD).

O sistema foi modelado sob a ótica da *Clean Architecture*, proposta por Martin (2017), que organiza a aplicação em camadas concêntricas com um fluxo de dependência estritamente unidirecional, de fora para dentro (Figura 3).

**Figura 3** - Camadas da *Clean Architecture*




Fonte: Martin (2017)

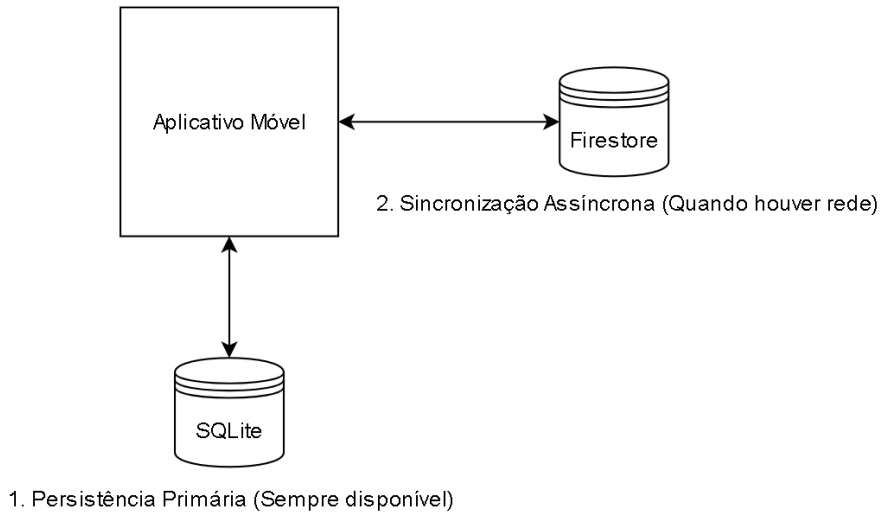
Esse isolamento arquitetural garante que as regras de negócio agronômicas (entidades centrais do domínio) permaneçam completamente agnósticas e imunes a alterações em *frameworks* de interface de usuário ou em tecnologias de persistência. Na camada de apresentação, o padrão *Model-View-ViewModel* (MVVM) é aplicado para desacoplar a interface gráfica da lógica de processamento de dados. O *ViewModel* atua como um orquestrador de estado reativo, permitindo que as validações paramétricas ocorram de forma eficiente e independente do ciclo de vida da interface móvel. Todo o escopo de desenvolvimento é regido pelos princípios SOLID, assegurando um código com baixo acoplamento e alta coesão estrutural.

## 2.3 RESILIÊNCIA DE DADOS E PARADIGMA OFFLINE-FIRST

A vulnerabilidade estrutural inerente ao "apagão de dados" no meio rural (intermitência ou ausência de conectividade) é suplantada pela adoção transversal do paradigma *Offline-First*. Diferentemente de aplicações tradicionais que falham ao tentar gravar dados diretamente na nuvem em áreas sem cobertura, esta arquitetura inverte a prioridade de persistência.

A arquitetura delega a gravação primária a um banco de dados relacional embarcado no próprio dispositivo móvel (SQLite), tratando a conectividade de rede externa como um mecanismo secundário e assíncrono. A Figura 4 esquematiza a topologia de persistência adotada para garantir a resiliência em campo.

**Figura 4** - Fluxograma da Arquitetura Offline-First




Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao garantir o registro transacional e estruturado das coletas de forma autônoma, o sistema preserva a resiliência da pesquisa agronômica. A sincronização com o *backend* (Google Cloud Firestore) é postergada para o momento oportuno de conectividade estável, blindando, assim, a integridade da experimentação contra as deficiências de infraestrutura de telecomunicações do ambiente rural.

# 3 REVISÃO DA LITERATURA

A pesquisa agronômica tem se beneficiado significativamente da integração de tecnologias digitais. Getahun, Kefale e Gelaye (2024) evidenciam, em sua revisão sistemática, que o uso de sensoriamento proximal e algoritmos de análise de dados são pilares essenciais para promover práticas agrícolas sustentáveis. Contudo, para o desenvolvimento de um ecossistema integrado viável, faz-se necessária a investigação do estado da arte sob três eixos computacionais: redes IoT, instrumentação de baixo custo em borda (*Edge*) e persistência em ambientes de baixa conectividade. As subseções a seguir promovem uma análise crítica destas vertentes, evidenciando as lacunas que justificam esta pesquisa.

## 3.1 SISTEMAS DE MONITORAMENTO IOT E A DEPENDÊNCIA DE CONECTIVIDADE

A literatura demonstra um esforço contínuo na aplicação de redes de sensores sem fio para a gestão de culturas. Trabalhos como os de Putri (2023) descrevem sistemas de controle automático de pH integrados com IoT aplicados à cultura de *Aloe Vera*. Na mesma linha, Zhu, Shang e Chen (2022) e Dankan Gowda et al. (2021) focam em ecossistemas baseados em IoT para a gestão em estufas e sistemas de irrigação automatizados, otimizando o uso da água e monitorando a produção agrícola. Avançando na complexidade espacial, Archbold et al. (2019) propuseram um sistema de medição de pH com geolocalização, permitindo avaliações em múltiplos pontos para fornecer recomendações iniciais de fertilização.

Entretanto, uma análise crítica destas arquiteturas revela uma vulnerabilidade estrutural significativa: a forte dependência de conectividade ininterrupta à internet. A maioria dessas soluções assume a disponibilidade de redes ativas diretamente no campo físico para enviar o dado à nuvem. Em ambientes rurais, sistemas que dependem da internet para a persistência primária frequentemente sofrem com a perda de pacotes e a inviabilidade de operação, evidenciando uma lacuna no que tange à resiliência de software em campo aberto.

## 3.2 VALIDAÇÃO INSTRUMENTAL E HARDWARES DE BAIXO CUSTO EM BORDA

Buscando otimizar a gestão de fertilizantes, Mardamootoo et al. (2021) discutem a importância de monitorar o fósforo por meio da integração de sensores. Behera et al. (2022) complementam essa visão destacando a eficácia do sensoriamento proximal, desde que adaptado às condições locais. Para viabilizar essas leituras de forma acessível, Placidi et al. (2021) validaram a utilização de sensores de umidade de baixo custo, demonstrando que, apesar das limitações financeiras, é possível obter dados altamente confiáveis.

Mais recentemente, Sulaeman (2024) avaliou detectores portáteis de nutrientes baseados no protocolo RS485. O autor conclui que, embora não substituam análises laboratoriais rigorosas, esses sensores apresentam linearidade aceitável para tomada de decisão rápida e monitoramento contínuo in-situ. E, conforme apontado por Santos et al. (2023), sondas multiparamétricas comerciais de baixo custo oferecem excelente repetibilidade para condutividade, mas exigem algoritmos robustos de software para desacoplar interferências de íons não nutricionais. Para orquestrar esses sensores de forma autônoma, publicações como as de Chicaiza (2024) consolidaram o microcontrolador ESP32 aliado à comunicação BLE/Wi-Fi como arquitetura eficiente. Seu processamento dual-core supera alternativas de alto consumo energético, tornando-se o padrão para sistemas embarcados mantidos a bateria e energia solar. Alinhado a isso, Rocha (2025) validou que calibrações dinâmicas enviadas via Bluetooth reduzem o tempo de manutenção do hardware de borda.

Contudo, embora estas propostas representem um avanço na aquisição física dos dados, elas apresentam uma limitação conceitual: o foco estrito no hardware. A coleta instrumental raramente é acompanhada de uma camada de software robusta para a governança dessa informação, limitando a capacidade de rastrear o manejo agronômico (como o histórico de produtos aplicados nas parcelas).

## 3.3 PERSISTÊNCIA LOCAL E ARQUITETURAS DESCONECTADAS

No que tange ao desenvolvimento de software para contornar a falta de internet, a literatura atual, como ressaltado por Elhattab, Abouelmehdi e Elatar (2023), destaca o grave problema do "apagão de dados" no meio rural. Pesquisas em ambientes de conectividade intermitente argumentam que sistemas IoT dependentes exclusivamente da nuvem falham sistematicamente.

Como solução, autores propõem a adoção de arquiteturas *Offline-First* — garantindo a persistência de dados no próprio dispositivo móvel (via banco de dados SQLite) com posterior sincronização assíncrona. A utilização de bancos de dados relacionais locais para posterior sincronização em nuvem é uma estratégia consolidada para mitigar o isolamento digital no campo (Mendes; Souza, 2024).

Apesar de abordarem o problema da intermitência, tais soluções operam, em sua maioria, de forma genérica. Não se observa na literatura pesquisada uma arquitetura que una essa persistência local estruturada à capacidade de gerenciar pesquisas e realizar a calibração dinâmica do sensor físico a partir do próprio aplicativo de forma centralizada.

## 3.4 ANÁLISE COMPARATIVA E DIFERENCIAIS DA SOLUÇÃO PROPOSTA

A revisão da literatura evidencia que as soluções atuais tendem a focar em domínios isolados. A Tabela 1 sintetiza essa análise, cruzando as principais abordagens do estado da arte com os requisitos de um ecossistema de monitoramento agrícola resiliente.

**Tabela 1** - Resumo dos estudos e relevância para o projeto

| **Trabalhos Correlatos** | **Objetivo do Estudo** | ***Offline-First*** | **App Móvel** |
|---|---|---|---|
| Putri (2023); Zhu et al. (2022); Archbold et al. (2019) | Redes IoT e Monitoramento de Estufas | Não (Dependência de Nuvem) | Parcial (Dashboards online) |
| Placidi et al. (2021); Sulaeman (2024); Chicaiza (2024) | Validação de Hardware (ESP32/RS485) | Não aplicável (Foco estrito no hardware) | Não |
| Elhattab (2025) | Arquitetura de Software Móvel | Sim | Sim |
| A Proposta (2026) | Ecossistema Integrado Ponta a Ponta | Sim (Sincronização Assíncrona) | Sim (SQLite) |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme ilustrado na Tabela 1, o grande diferencial da arquitetura desenvolvida nesta pesquisa reside na sua integração de ponta a ponta. Diferentemente de abordagens voltadas exclusivamente à instrumentação (como Sulaeman, 2024) ou de sistemas que dependem criticamente de conectividade em tempo real (como Putri, 2023 e Zhu et al., 2022), este trabalho

propõe uma arquitetura que preenche as lacunas deixadas por essas pesquisas ao consolidar três diferenciais tecnológicos principais. Primeiramente, a mitigação da dependência de rede é alcançada pela adoção do padrão arquitetural *Offline-First*, garantindo que a falta de conectividade no campo não resulte em perda de dados. Em segundo lugar, o ecossistema promove uma governança de dados descentralizada; enquanto outros estudos tratam a leitura física de forma isolada, o aplicativo móvel desenvolvido atua como um gerenciador relacional que não apenas persiste a informação no banco SQLite, mas a vincula hierarquicamente a pesquisadores, parcelas experimentais georreferenciadas e históricos de aplicação de produtos. Por fim, a gestão de calibração na ponta consolida-se por meio de uma interface de *software* que permite recalibrar os ganhos e *offsets* do sensor físico dinamicamente em campo, mitigando a necessidade de reprogramação de *firmware*.

# 4 METODOLOGIA

Este projeto de pesquisa adota uma abordagem metodológica dividida em três partes principais: levantamento bibliográfico e definição da arquitetura do sistema, desenvolvimento, implementação e validação dos módulos do sistema.

## 4.1 LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO

O levantamento bibliográfico teve por objetivo identificar, selecionar e sintetizar evidências acerca de (i) aplicações de IoT na agricultura, (ii) sensores e técnicas de sensoriamento para monitoramento do solo e (iii) arquiteturas de software aplicáveis a sistemas embarcados móveis. A estratégia seguiu procedimentos de revisão sistemática adaptada ao escopo de projeto. As buscas foram realizadas nas bases de dados científicas: Portal Periódicos da Capes, *IEEE Xplore*, *Science Direct, Google Scholar, MDPI (Sensors) e ResearchGate* com as principais palavras-chaves (Tabela 2) de 2010 a 2025. Dezenas de artigos de periódicos, teses publicadas, anais de conferências e artigos de *journals* foram encontrados neste levantamento.

Foram combinadas palavras-chave em português e inglês. As principais combinações incluíram termos relativos a: "*precision agriculture*", "*IoT in agriculture*", "*soil sensors*", "*Bluetooth Low Energy*", "ESP32", "*mobile application agriculture*", "*software architecture IoT*" e equivalentes em português. A Tabela 2 registra as palavras-chave utilizadas e sua tradução para replicabilidade.

Para a construção e o desenvolvimento do sistema, foram utilizados diversos componentes de hardware, tecnologias e ferramentas de software, conforme detalhado na Tabela 3.

## 4.2 DEFINIÇÃO DA ARQUITETURA DO SISTEMA

A definição da arquitetura do sistema baseou-se na análise crítica da literatura selecionada e nos requisitos específicos do projeto: coleta em campo sem conectividade permanente, baixo custo, mobilidade, robustez das leituras, facilidade de manutenção e controle de coleta.

**Tabela 2** - Principais palavras-chave utilizadas para levantamento bibliográfico

| Palavras-chave em Português | Palavras-chave em Inglês |
|---|---|
| Agricultura de precisão | Precision agriculture |
| Aplicações de IoT na agricultura | IoT applications in agriculture |
| IoT no monitoramento agrícola | IoT monitoring in agriculture |
| Tecnologias para agricultura de precisão | Technologies for precision agriculture |
| Sensores para agricultura de precisão | Sensors for precision agriculture |
| Aplicativos móveis para agricultura | Mobile applications in agriculture |
| Padrões de design de software | Software design patterns |
| Arquiteturas de software para IoT | Software architectures for IoT |
| Variáveis agrícolas e monitoramento de solo | Agricultural variables and soil monitoring |
| Macronutrientes e micronutrientes na agricultura | Macronutrients and micronutrients in agriculture |

Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.2.1 Visão Geral e Módulos

A arquitetura proposta para o sistema foi planejada de forma modular, de modo a garantir escalabilidade, flexibilidade de manutenção e capacidade de adaptação a diferentes cenários de uso.

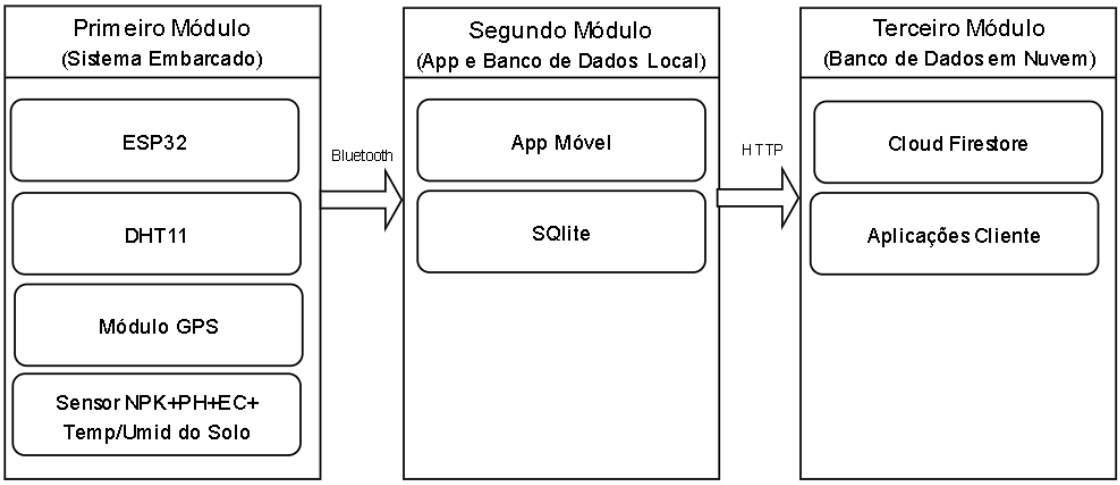
**Tabela 3** - Recursos e ferramentas utilizados

| Categoria | Recursos/Ferramentas utilizadas |
|---|---|
| Hardware | ESP32, Sensor 7 em 1, Módulo RS 485, Sensor DHT11, Módulo GPS NEO 6M, Placa perfurada, Caixa hermética, Bateria 18650 de 3.7V |
| Linguagens de Programação | Dart, Wiring(Arduino), SQL |
| Framework | Flutter |
| API Backend | Firebase |
| Banco de Dados: | Firestore, SQLite |
| Ferramentas de Desenvolvimento | Arduino IDE, VS Code e Android Studio |

Fonte: elaborado pelo autor.

O sistema é composto por três módulos principais. O primeiro é o módulo de aquisição de dados, responsável pela coleta das variáveis ambientais e agronômicas em campo, por meio de sensores integrados a um microcontrolador. O segundo é o aplicativo móvel, que atua como interface entre o usuário e o sistema, recebendo os dados do módulo de aquisição, realizando o armazenamento local e oferecendo ferramentas de visualização e análise. O terceiro módulo corresponde aos serviços em nuvem, que garantem a persistência remota, a sincronização e a disponibilização das informações para consultas posteriores e integração com outras ferramentas. A Figura 5 apresenta o fluxo de comunicação entre os módulos.

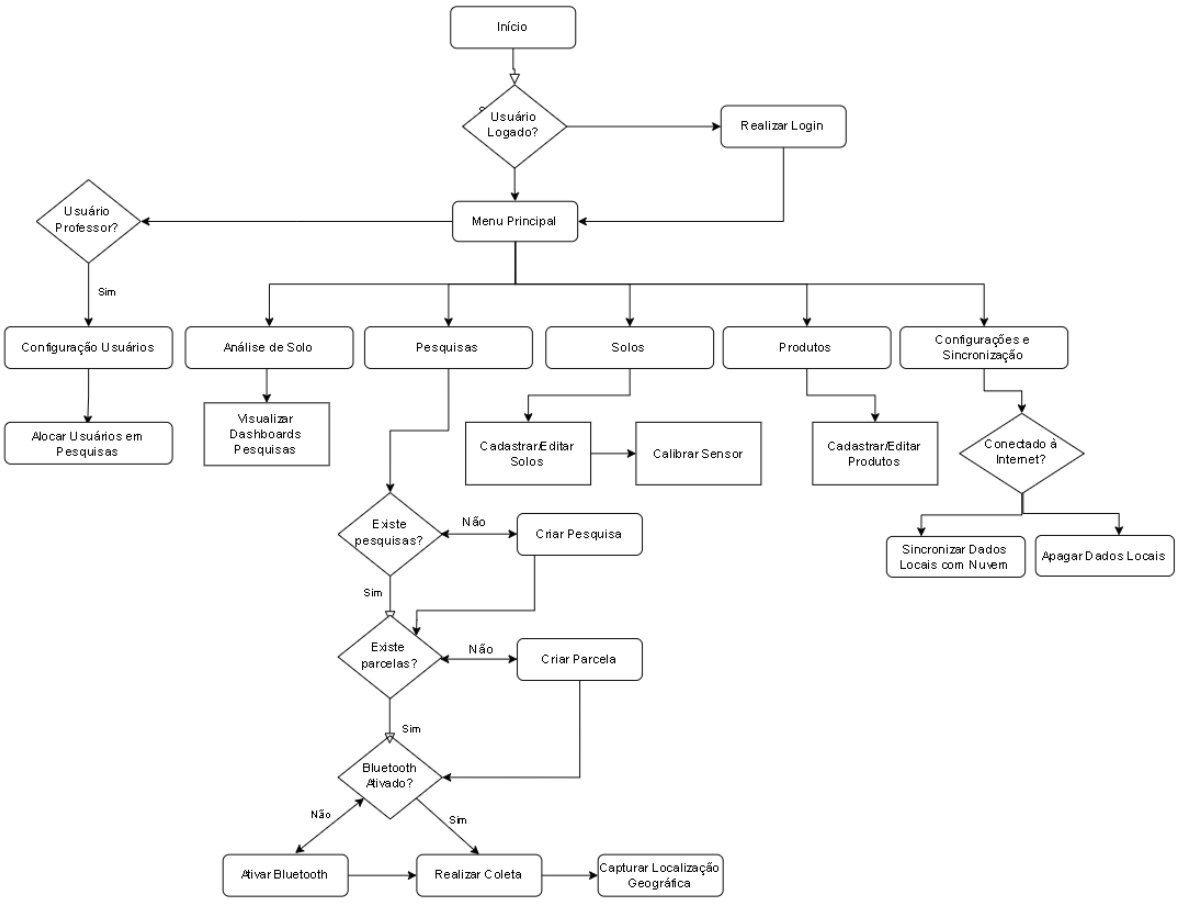
**Figura 5** - Fluxograma da comunicação dos dados.




Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 6 apresenta um fluxograma das opções que o usuário pode fazer ao utilizar o sistema.

**Figura 6** - Fluxograma das ações do usuário ao utilizar o sistema




Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.2 Protótipo de Hardware: Componentes e Montagem

O módulo de aquisição é responsável pela coleta das informações fundamentais para o monitoramento das condições do solo e do ambiente. Ele é composto por um microcontrolador ESP32, um sensor multiparâmetro Halisense 7 em 1, um sensor DHT11 para aferição da temperatura e umidade do ar, e um módulo GPS NEO-6M para registro das coordenadas geográficas das coletas, permitindo um mapeamento do solo estudado.
As especificações técnicas do microcontrolador estão descritas na Tabela 4.

**Tabela 4** – Especificações Técnicas do Microcontrolador ESP32

| **Especificações** | **ESP32** |
|---|---|
| MCU | Xtensa Dual-Core 32-bit LX6 |
| Frequência Típica | 160 MHz |
| SRAM | 512 kBytes |
| Flash | SPI Flash, expansível até 16MBytes |
| GPIO | 36 pinos |
| Hardware / Software PWM | 1 / 16 Canais |
| SPI / I2C / I2S / UART | 4/2/2/2 |
| ADC | 12-bit |
| Temp. de trabalho | -40°C - 125°C |

Fonte: Adaptado com base nas especificações da Espressif Systems.

Para a aquisição de dados do solo, foi selecionado o sensor multifuncional Halisense, modelo TH-EC-PH-NPK, devido à sua capacidade de medir simultaneamente sete variáveis agronômicas essenciais — umidade, temperatura, condutividade elétrica, pH, nitrogênio, fósforo e potássio — em um único dispositivo. O equipamento possui selo de proteção IP68, garantindo resistência à poeira e imersão temporária, característica indispensável para a operação em condições adversas de campo. As especificações técnicas e as margens de precisão do sensor estão detalhadas na Tabela 5.

**Tabela 5** - Especificações Técnicas do Sensor Halisense

| **Parâmetro** | **Faixa de Medição** | **Precisão** |
|---|---|---|
| Temperatura | -40°C a 80°C | ±0.5°C |
| Umidade | 0 a 100%RH | ±3% (em 0-50%) / ±5% (em 50-100%) |
| Condutividade (EC) | 0 a 20000 us/cm | ±3% (em 0-10000 us/cm) / ±5% (em 10000-20000 us/cm) |
| pH | 3 a 9 PH | ±0.3 PH |
| Nitrogênio (N) | 1 a 2999 mg/kg | 1 mg/kg (Resolução) |
| Fósforo (P) | 1 a 2999 mg/kg | 1 mg/kg (Resolução) |
| Potássio (K) | 1 a 2999 mg/kg | 1 mg/kg (Resolução) |

Fonte: Adaptado do manual do fabricante.

De acordo com as especificações do fabricante, o método de detecção rápida por sensores eletroquímicos apresenta limitações inerentes, especialmente na leitura direta de macronutrientes (NPK), o que pode introduzir desvios na precisão absoluta. Para contornar esta limitação, a arquitetura interna do sensor expõe seus registradores tanto para leitura quanto para escrita. Essa característica técnica é fundamental para o projeto, pois permite que o ecossistema funcione não apenas aferindo os dados em tempo real, mas reescrevendo as constantes de calibração dinamicamente para obter maior precisão em diferentes perfis de solo.

A comunicação física entre o sensor Halisense e o microcontrolador ESP32 foi implementada via interface serial RS485, utilizando o protocolo Modbus RTU, conforme os princípios de instrumentação fundamentados na Seção 2.1. Na topologia desenvolvida, o ESP32 atua de forma ativa como cliente, estruturando e enviando as requisições de leitura e escrita. O sensor, operando como servidor (configurado no endereço padrão 1), interpreta essas requisições e devolve os quadros de dados contendo as aferições brutas ou confirmando os ajustes de calibração.

Para complementar os dados agronômicos, o protótipo incorpora o monitoramento das condições microclimáticas (temperatura e umidade do ar), uma vez que variações ambientais impactam diretamente o balanço hídrico e nutricional das plantas (Li et al., 2019). Para esta finalidade, empregou-se o sensor digital DHT11, que integra um elemento capacitivo para umidade e um termistor NTC para temperatura. A escolha deste componente justifica-se pelo baixo consumo energético e pela simplicidade de integração via protocolo *Single-Wire*. As especificações e tolerâncias do DHT11 estão apresentadas na Tabela 6.

**Tabela 6** – Especificações do sensor DHT11

| **Característica** | **Especificação** |
|---|---|
| Faixa de medição - Temperatura | 0 a 50 °C |
| Faixa de medição – Umidade relativa | 20% a 90% UR |
| Precisão – Temperatura | ±2 °C |
| Precisão – Umidade relativa | ±5% UR |
| Resolução | 1 °C, 1% UR |
| Tempo de amostragem | 1 Hz |
| Comunicação | Digital, protocolo Single-Wire |
| Tensão de operação | 3,3 a 5,5 V DC |

Fonte: Adaptado com base no *datasheet* do fabricante.

Para garantir o georreferenciamento exato de cada parcela coletada, elemento vital na agricultura de precisão, o protótipo foi equipado com o módulo GPS NEO-6M. Este componente foi selecionado por possuir alta sensibilidade (-162 dBm), antena cerâmica integrada e memória interna que acelera o Tempo para Primeira Aquisição (TTFF).

A integração do módulo NEO-6M com o microcontrolador ESP32 ocorre via interface serial UART. Os dados espaciais são transmitidos no formato padrão NMEA, que fornece sentenças contendo as coordenadas, altitude e horário UTC, facilitando a vinculação espacial e temporal das leituras no *firmware*. A Tabela 7 detalha as especificações operacionais do módulo utilizado.

**Tabela 7** - Características do Módulo de GPS NEO-6M

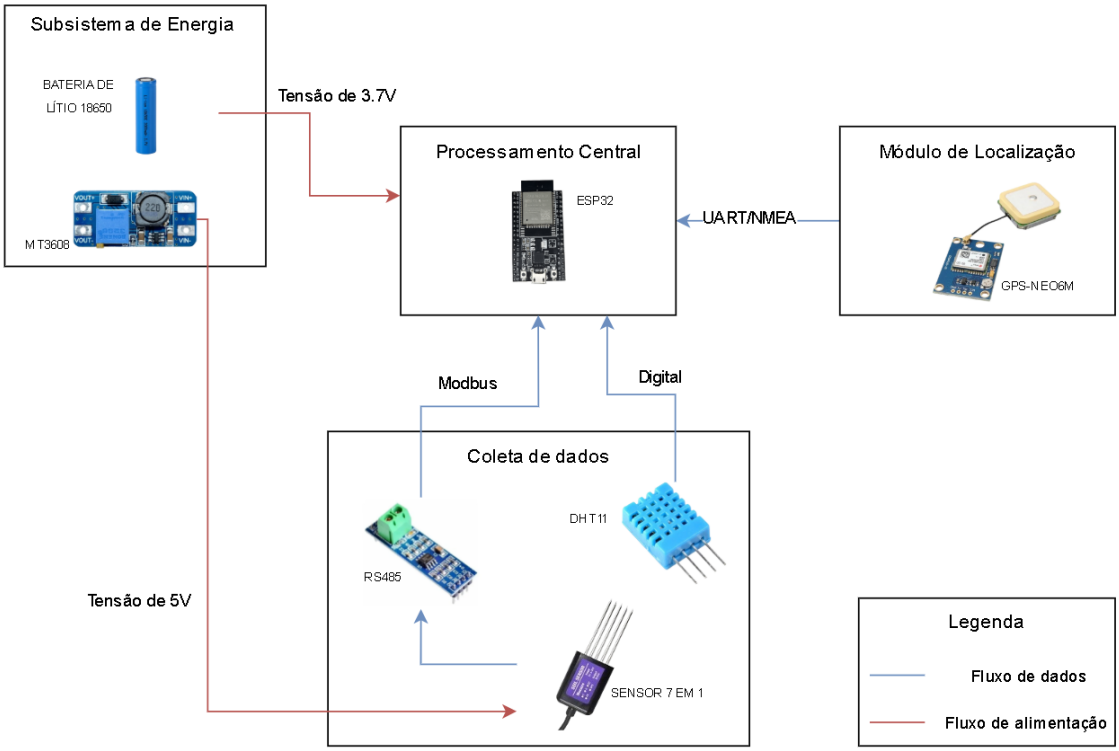
| Característica | Especificação |
|---|---|
| Motor GPS | u-blox 6, 50 canais |
| Protocolo de Comunicação | NMEA (padrão), UBX (binário) |
| Taxa de Atualização | Até 5 Hz (1 Hz por padrão) |
| Precisão de Posição | 2.5 metros (CEP - Erro Circular Provável) |
| Precisão com SBAS | 2.0 metros (CEP) com WAAS, EGNOS, MSAS |
| Tempo de Aquisição (TTFF) | Partida a frio: ~27s<br>Partida a quente: ~1s |
| Sensibilidade de Rastreio | -162 dBm |
| Sensibilidade de Aquisição | -148 dBm (partida a frio) |
| Tensão de Operação | 2.7V – 3.6V (módulo) |
| Interface | UART (Serial) |
| Baud Rate Padrão | 9600 bps |

Fonte: Elaborado pelo autor, com base no manual de integração de hardware da u-blox.

A programação do firmware do ESP32 foi realizada em *wiring* utilizando o framework Arduino. A arquitetura do código foi projetada para ser reativa e eficiente em termos de energia. Em vez de um loop contínuo que realiza leituras, o sistema opera em um modelo orientado a eventos, onde a leitura do sensor Halisense só é disparada ao receber um comando específico ("LER") via BLE. Para a funcionalidade de calibração, o firmware implementa um parser de Notação de Objetos em JavaScript (JSON), utilizando a biblioteca ArduinoJson, que decodifica os parâmetros de ganho e *offset* recebidos do aplicativo móvel e os traduz em comandos de escrita *Modbus* (por meio das funções de writeSingleRegister e writeMultipleRegisters), salvando-os permanentemente na memória não-volátil do sensor. Essa abordagem reativa e a separação de lógicas de leitura e calibração garantem economia de energia e uma comunicação mais precisa.

Como a tensão da bateria varia (3.5V a 4.0V), um módulo conversor DC-DC step-up (MT3608) foi utilizado para elevar e estabilizar a tensão de saída em 5V. Esta linha de 5V alimenta o sensor 7 em 1. Sensores de baixo consumo, como o DHT11, são alimentados diretamente pela saída de 3.3V do próprio ESP32. O diagrama resultante está apresentado na Figura 7.

**Figura 7** - Modelagem do circuito do primeiro módulo.




Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.2.3 Montagem do Protótipo e Encapsulamento

A transição do diagrama esquemático (apresentado na Figura 7) para um dispositivo de campo funcional exigiu uma estratégia de montagem que priorizasse a robustez, a modularidade e a proteção dos componentes eletrônicos. Optou-se pela utilização de uma placa de circuito padrão do tipo perfurada (fenolite, 9x15 cm) como base para o protótipo, uma escolha que alia baixo custo à flexibilidade para ajustes durante a fase de desenvolvimento.

A montagem seguiu o layout planejado no esquemático, visando minimizar a interferência eletromagnética e facilitar a manutenção. Os módulos principais, como o ESP32 e o GPS, foram instalados em soquetes fêmeos, permitindo sua fácil substituição sem a

necessidade de dessoldagem. As conexões elétricas foram realizadas na face inferior da placa, utilizando a técnica de barramento para a distribuição das linhas de alimentação (+5V) e Terra (GND). Esta técnica consiste na criação de "espinhas dorsais" de energia com fio de cobre rígido, das quais derivam conexões individuais (*jumpers*) para cada componente, garantindo um ponto de terra comum estável e minimizando a queda de tensão. Para o encapsulamento, foi definido o uso de uma caixa hermética com grau de proteção IP67.

### 4.2.4 Aplicativo Móvel: Arquitetura e Desenvolvimento

O segundo módulo corresponde ao aplicativo móvel, desenvolvido com o objetivo de fornecer ao usuário uma interface intuitiva para interação com o sistema, visualização das informações dos cultivos e gerenciamento dos dados coletados. A aplicação foi implementada em *Flutter/Dart*, linguagem e framework que permitem a criação de soluções multiplataforma a partir de um único código-fonte, garantindo compatibilidade com dispositivos Android e, futuramente, iOS.

A lógica do aplicativo foi estruturada segundo a *Clean Architecture*, que organiza o código em camadas distintas — dados, domínio e apresentação — promovendo separação de responsabilidades, maior testabilidade e facilidade de manutenção. O padrão *MVVM* foi adotado para desacoplar a interface gráfica da lógica de negócios, utilizando a biblioteca Provider para o gerenciamento do estado da aplicação.

Na camada de dados, a arquitetura de acesso às informações segue o *Repository Pattern*, que abstrai a lógica de comunicação com as fontes de dados. Nesse modelo, a classe abstrata *Repository* define as operações básicas para leitura e escrita, enquanto a *Repository Implementation* implementa essas funções, podendo escolher dinamicamente entre acessar dados localmente ou em nuvem. A *Remote Data Source* gerencia especificamente as operações remotas. Essa arquitetura permite que, caso seja necessário migrar para outro banco de dados remoto no futuro, a mudança se limite à substituição das funções de Remote Data Source, sem impactar as demais camadas do sistema.

A camada de domínio concentra a lógica de negócio, incluindo as entidades centrais do sistema, os casos de uso que encapsulam regras específicas de cada operação, e as interfaces dos repositórios, que definem contratos padronizados para implementação das fontes de dados.

Por fim, a camada de apresentação reúne as páginas e *widgets* responsáveis pela interação com o usuário, com controladores de UI que coordenam as ações, garantem a consistência dos dados exibidos e permitem manipulação eficiente das informações.

O aplicativo adota a abordagem *offline-first*, armazenando localmente as leituras em um banco *SQLite* por meio da biblioteca *sqflite* (versão 2.0.0+3). Isso possibilita acesso aos dados mesmo sem conectividade, com envio de dados ao servidor remoto realizado por meio da opção de transmissão no aplicativo.

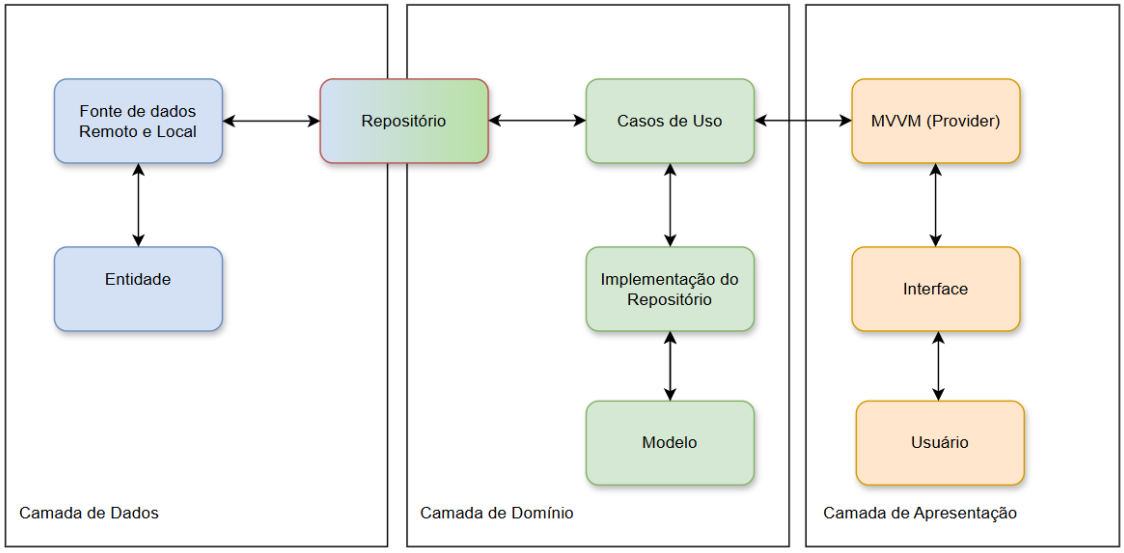
A comunicação com o módulo de aquisição é realizada por meio do BLE, utilizando a biblioteca *flutter_blue_plus* (versão 1.34.4). Essa conexão garante baixo consumo de energia e latência reduzida, sendo adequada para a transferência frequente de dados ambientais. Além de receber as leituras dos sensores, o BLE permite o envio de comandos ao ESP32. O aplicativo pode ser instalado diretamente no smartphone por meio de um arquivo APK (*Android Application Pack* – Pacote de Aplicação Android).

Durante a fase inicial do projeto, foi considerada a utilização da tecnologia LoRa (*Long Range*) devido ao seu alcance em áreas rurais. No entanto, sua baixa taxa de transferência, mais adequada a transmissões esporádicas, levou à opção pelo BLE, que oferece maior taxa de atualização e suporte à comunicação interativa com o sistema.

O desenvolvimento do aplicativo seguiu ainda os princípios *SOLID*, favorecendo modularidade e extensibilidade. Essa abordagem permitirá a integração de novos sensores ou serviços no futuro sem necessidade de reescrever as camadas existentes.

A Figura 8 apresenta o diagrama de relações entre as camadas do aplicativo, e a Tabela 8 resume os principais padrões de design utilizados.

**Figura 8** - Diagrama de relações entre as camadas




Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.2.5 Backend em Nuvem: Google Cloud Firestore

O terceiro componente do sistema é o backend em nuvem, responsável pela persistência remota, sincronização e disponibilização dos dados coletados para múltiplos usuários. Para esta função, foi selecionada a plataforma *Google Cloud Firestore*, um banco de dados *NoSQL* flexível e escalável.

A arquitetura de dados do *Firestore* é baseada em um modelo de documentos e coleções. Os dados são armazenados em documentos, que são similares a objetos JSON, e estes documentos são organizados em coleções.

Este banco de dados em nuvem foi selecionado devido à sua capacidade de gerenciar grandes volumes de dados, suporte a consultas otimizadas e facilidade de implementação de autenticação e controle de acesso, eliminando a necessidade de criar uma *API* privada com *endpoints* específicos.

**Tabela 8** - Principais Padrões de Design utilizados no Aplicativo Móvel

| Tipo | Padrão/Arquitetura | Categoria | Descrição |
|---|---|---|---|
| Padrão de design | Factory Method | Criacional | Define um método para criar objetos sem expor diretamente seus construtores. |
| Padrão de design | Abstract Factory | Criacional | Cria famílias de objetos relacionados sem especificar suas classes concretas. |
| Padrão de design | Singleton | Criacional | Garante que uma única instância de uma classe exista e seja acessível globalmente. |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Padrão de design | Adapter | Estrutural | Converte a interface de uma classe para outra esperada pelo sistema. |
| Padrão de design | Proxy | Estrutural | Adiciona uma camada intermediária para controlar o acesso a outro objeto. |
| Padrão de design | Observer | Comportamental | Permite que um objeto notifique outros sobre mudanças de estado. |
| Padrão de design | Command | Comportamental | Encapsula uma operação como um objeto, permitindo que seja reutilizável e desacoplado. |
| Padrão de design | Template Method | Comportamental | Define o esqueleto de um algoritmo, permitindo que subclasses personalizem partes específicas. |
| Arquitetura | Clean Architecture | Arquitetural | Promove a separação de responsabilidades, facilitando a manutenção, testes e escalabilidade. |
| Arquitetura | MVVM | Arquitetural | Separa a lógica de apresentação da interface do usuário, facilitando o desenvolvimento e testes. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para organizar as informações do sistema no *Firestore*, foi projetado um modelo de dados composto por nove coleções principais. Cada coleção é responsável por armazenar um tipo específico de entidade, como usuários, pesquisas, parcelas e as próprias coletas de dados do solo. Essa estrutura garante a organização e a escalabilidade das informações. A finalidade de cada coleção está detalhada na Tabela 9.

Embora tenha sido utilizado um banco não relacional, ainda é possível identificar relações lógicas entre as coleções. A Figura 9 apresenta as correspondências e cardinalidades existentes entre elas.

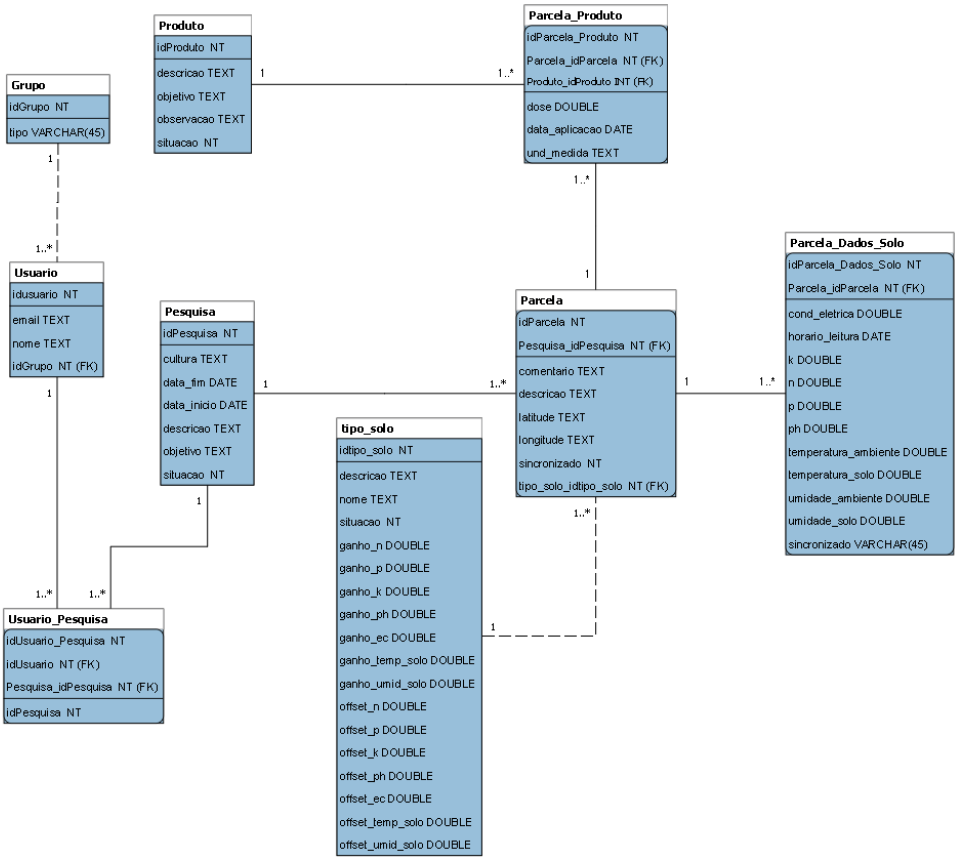
**Tabela 9** - Estrutura de Coleções no Banco de Dados *Firestore*

| Coleção | Descrição da Finalidade |
|---|---|
| usuarios | Armazena os dados de cada usuário cadastrado no sistema (nome, e-mail, nível de permissão). |
| pesquisa | Contém as informações de cada projeto de pesquisa criado (nome da pesquisa, objetivo, data de início, data de conclusão). |
| parcela | Descreve cada parcela ou área de estudo associada a uma pesquisa (identificação, descrição, localização GPS). |
| parcela_dados_solo | Armazena cada leitura individual dos sensores de solo, vinculada a uma parcela específica. |
| produto | Cadastra os tipos de culturas ou produtos que estão sendo analisados nas pesquisas (Glifosato, 2,4 -D, Mancozebe). |
| tiposolo | Cadastra os diferentes tipos de solo para classificação das parcelas (Latossolo Vermelho, Argissolo). |

| | |
|---|---|
| parcela_produto | Tabela de relação que associa um produto (cultura) a uma ou mais parcelas. |
| usuario_pesquisa | Tabela de relação que define quais usuários têm permissão para acessar ou modificar quais pesquisas. |
| grupo | Permite a organização de usuários em grupos com permissões compartilhadas. |

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 9** - Figura 9 - Diagrama de relações entre as coleções do banco de dado




Fonte: elaborado pelo autor.

Um componente fundamental para a segurança do sistema são as regras de segurança do Firestore. Elas foram configuradas para garantir que um usuário só possa ler e escrever dados pertencentes às pesquisas às quais ele está associado (conforme definido na coleção usuario_pesquisa). Essa lógica de controle de acesso é executada diretamente nos servidores do *Google*, garantindo que a integridade e a confidencialidade dos dados de pesquisa sejam mantidas, sem a necessidade de um servidor intermediário. As imagens com a estrutura de dados das coleções estão disponíveis no Apêndice B.

## 4.3 VALIDAÇÃO E TESTES DO SISTEMA

O processo de validação do módulo incluiu testes unitários, para verificar individualmente o funcionamento dos componentes e a integração entre módulos.
A metodologia de validação do sistema é uma etapa crucial do projeto, dividida em testes de software (como a validação de usabilidade) e testes instrumentais do hardware. Esta seção detalha os quatro protocolos de testes de bancada definidos para aferir a acurácia, linearidade e resposta do protótipo de hardware.

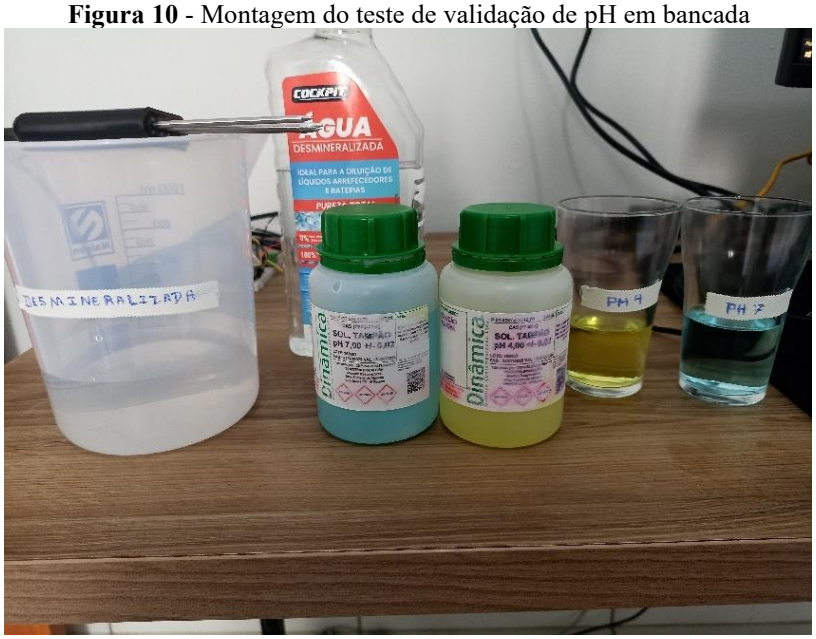
### 4.3.1 Protocolo de Validação do Sensor de pH

O primeiro protocolo de validação instrumental foi desenhado para verificar a precisão da variável pH do sensor Halisense. Para este ensaio experimental, foram utilizadas soluções tampão de referência padrão certificadas, com valores conhecidos de pH 4,0 e pH 7,0. O procedimento consistiu na imersão sequencial das hastes do sensor em cada uma das soluções, iniciando-se pela medição na solução neutra (pH 7,0) para estabelecer a referência.

Um passo essencial do protocolo foi a lavagem intermediária do sensor com água desmineralizada e secagem, realizada entre cada medição para evitar qualquer contaminação cruzada. Após a aferição do padrão neutro, o sensor foi imerso na solução ácida (pH 4,0). Durante o processo, observou-se empiricamente que, após a troca de tampões, era necessário um período de espera de 10 a 15 segundos para que o sensor atingisse uma leitura eletroquímica estável.

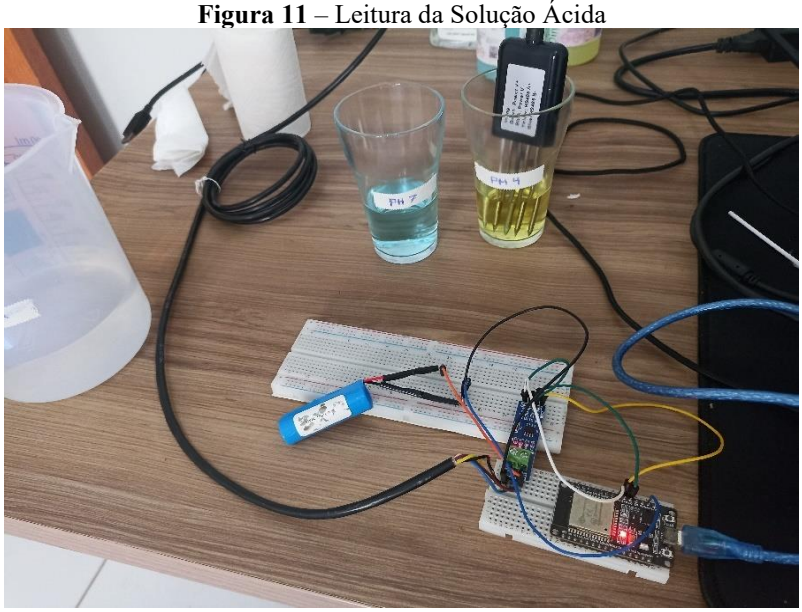
Após este período de estabilização, foram registradas diversas leituras em cada tampão. Este processo de múltiplas leituras permitiu a determinação e o ajuste iterativo dos parâmetros de calibração implementados no firmware do ESP32. As leituras finais calibradas foram então registradas para posterior comparação com os valores de referência e cálculo do desvio. O arranjo experimental, demonstrando os materiais e a montagem do teste, é apresentado nas Figuras 10 e 11.

**Figura 10** - Montagem do teste de validação de pH em bancada




Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

**Figura 11** – Leitura da Solução Ácida




Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

### 4.3.2 Protocolo de Validação do Sensor de Condutividade Elétrica (CE)

Para avaliar a linearidade e a acurácia do sensor de condutividade elétrica, foi aplicado o método da diluição em série a partir de um reagente padrão. O protocolo seguiu padrões laboratoriais

para a preparação de soluções de referência. O procedimento iniciou-se com a preparação de uma solução-mãe de concentração conhecida (0,01 Molar), dissolvendo-se precisamente 0,746g de Cloreto de Potássio (KCl) de grau analítico (P.A.) em 1 Litro de água desmineralizada. Esta etapa exigiu o uso de uma balança analítica de precisão e um becker de 1000 mL para garantir a exatidão da concentração, que resulta em uma condutividade teórica de 1413 µS/cm a 25°C. O sensor Halisense realiza compensação automática de temperatura, ajustando as medições de EC para valor equivalente a 25°C.

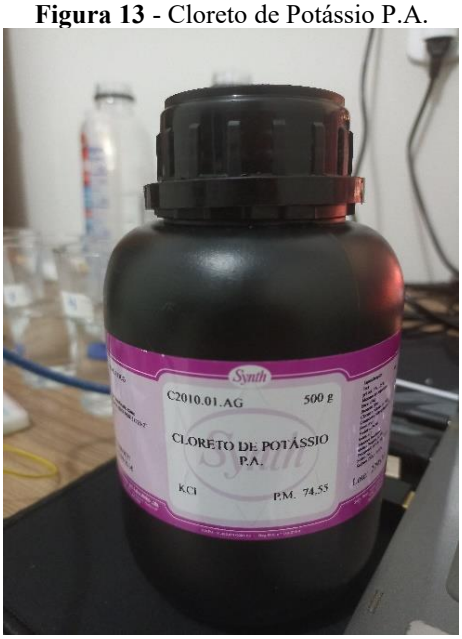
A partir da solução-mãe, foram preparadas diluições em série destinadas à construção de uma curva de calibração composta por cinco pontos. O copo “4” foi preparado inicialmente com uma mistura de 50% de solução-mãe e 50% de água desmineralizada. Em seguida, o copo “3” foi obtido a partir de uma diluição sucessiva, contendo 50% do conteúdo do copo “4” e 50% de solução-mãe. O procedimento foi repetido de forma sequencial até o copo “0”, que continha exclusivamente água desmineralizada. As leituras do sensor em cada ponto foram registradas para posterior análise de regressão linear ($R^2$). A bancada de preparação, incluindo os materiais, é documentada na Figura 12 e 13.

**Figura 12** - Bancada para o ensaio de Condutividade Elétrica




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 13** - Cloreto de Potássio P.A.




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 4.3.3 Protocolo de Caracterização da Resposta em Função da Umidade

Para avaliar a influência da umidade nas leituras do sensor e validar a estabilidade das medições em um meio inerte, foi desenhado um protocolo de caracterização utilizando areia de quartzo e água desmineralizada. A escolha destes materiais justifica-se por suas propriedades físico-químicas: a areia de quartzo atua como uma matriz física inerte e isolante, enquanto a água desmineralizada, isenta de íons dissolvidos, garante que variações na condutividade elétrica (CE) e nos nutrientes (NPK) não sejam causadas por reações químicas do solo, mas sim pelas características intrínsecas do funcionamento do sensor em meio úmido.

**Figura 14** - Bancada experimental com areia de quartzo e água desmineralizada




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O experimento foi conduzido em bancada sob temperatura ambiente controlada, registrando-se uma média inicial de 35,3 °C. O protocolo experimental iniciou-se com a determinação da leitura basal, realizada por meio da inserção do sensor no substrato de areia de quartzo completamente seca, estabelecendo-se assim o ponto zero de referência. Subsequentemente, procedeu-se à adição controlada de água desmineralizada em incrementos sucessivos de 50 mL.

Após cada adição de fluido, realizou-se a homogeneização do substrato com o auxílio de uma espátula. Esta etapa foi necessária para garantir a distribuição uniforme da umidade por toda a matriz de areia, mitigando o risco de formação de bolsões de água que pudessem distorcer as medições. Para a coleta dos dados, o sensor foi inserido na mistura homogeneizada e, após o período de estabilização, o sistema executou 10 leituras consecutivas com um intervalo programado de 5 segundos entre cada amostragem. Após as leituras, foi calculada a média aritmética para cada nível de umidade. Este ciclo de adição, homogeneização e coleta foi repetido sistematicamente até que o substrato atingisse o ponto de saturação hídrica, com um volume acumulado de 250 mL, totalizando seis estágios de medição (0, 50, 100, 150, 200 e 250 mL).

**Figura 15** - Execução do protocolo de caracterização com sensor inserido na matriz úmida




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

### 4.3.4 Protocolo de Interferência Salina

O quarto ensaio de bancada foi delineado para avaliar os limites da arquitetura eletroquímica do sensor Halisense sob condições de elevada salinidade não nutricional. O objetivo principal consistiu em verificar a ocorrência de falsos positivos na inferência de NPK, isolando e demonstrando a influência direta da CE nos algoritmos internos do equipamento.

Para a condução deste experimento, utilizou-se o protótipo instrumentado, uma matriz inerte de areia de quartzo previamente umedecida com água desmineralizada, Cloreto de Sódio (NaCl), uma balança de precisão e uma espátula para homogeneização. A escolha do NaCl justifica-se por sua capacidade de elevar drasticamente a força iônica e a condutividade da amostra sem introduzir qualquer traço dos macronutrientes avaliados.

O procedimento iniciou-se com a coleta de uma leitura de referência (linha de base) da matriz inerte umedecida, isenta de aditivos. Em seguida, optou-se por um ensaio de estresse de etapa única, no qual foi adicionada uma carga de 7 gramas de NaCl diretamente à amostra. A mistura foi homogeneizada com a espátula para garantir a diluição e a distribuição uniforme do sal na fase aquosa da areia. Após a homogeneização, estipulou-se um período de estabilização físico-química de 15 minutos para o equilíbrio eletroquímico do meio. Decorrido este intervalo,

as leituras paramétricas de CE e NPK foram registradas de forma consolidada por meio do aplicativo móvel.

### 4.3.5 Protocolo de Validação do Aplicativo Móvel

A validação do aplicativo móvel, em contraste com a validação instrumental do hardware, seguiu uma abordagem de verificação contínua integrada ao ciclo de desenvolvimento. O objetivo foi garantir a correção funcional, a integridade dos dados e a robustez da arquitetura. A estratégia foi fundamentada pela própria arquitetura de software (*Clean Architecture* e *MVVM*), que, ao desacoplar rigorosamente as responsabilidades, facilitou a aplicação de testes unitários focados. À medida que as camadas eram implementadas, testes de integração validaram o fluxo de dados entre os componentes. Por fim, os próprios ensaios de bancada do hardware (descritos nas seções 4.3.1 a 4.3.3) serviram como o teste de integração de ponta-a-ponta, validando a comunicação efetiva entre o dispositivo físico e o aplicativo.

# 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento do sistema integrado para coleta e análise de dados agrícolas, conforme a metodologia descrita. Para atender aos objetivos do projeto e fornecer uma análise crítica estruturada, o capítulo foi reorganizado nas seguintes seções: (i) a apresentação dos protocolos de validação aplicados; (ii) a validação instrumental do hardware através de ensaios de bancada, incluindo um novo teste de limitações; (iii) a análise de custos do protótipo e sua comparação frente à literatura e ao mercado de precisão; (iv) um estudo de caso prático demonstrando as vantagens e a capacidade analítica da governança de dados via aplicativo móvel; e, por fim, (v) uma discussão crítica sobre as limitações inerentes à adoção de tecnologias de baixo custo.

## 5.1 PROTOCOLOS DE VALIDAÇÃO

Para assegurar que os dados gerados pelo protótipo de baixo custo possuam validade científica, foi necessário submeter a instrumentação a ambientes estritamente controlados antes de sua aplicação em campo. Conforme delineado na Metodologia, os resultados obtidos neste trabalho derivam da execução de uma bateria experimental projetada para avaliar a acurácia, a linearidade, a robustez e as limitações operacionais do *hardware*, estruturando a validação em quatro frentes protocolares complementares.

Primeiramente, o protocolo de pHmetria concentrou-se em analisar a resposta potenciométrica do sensor frente a diferentes níveis de acidez, utilizando soluções tampão certificadas de pH 4,0 e pH 7,0 para determinar o desvio linear (*offset* e ganho) e parametrizar a correção matemática embarcada no *firmware* do ESP32. Em segundo lugar, o protocolo de Condutividade Elétrica (CE) avaliou a linearidade do equipamento em responder proporcionalmente à concentração iônica por meio da diluição volumétrica em série de Cloreto de Potássio (KCl), partindo de uma solução-mãe de 1413 µS/cm, etapa fundamental para monitorar a dinâmica de lixiviação e salinidade sem distorção das curvas. Para isolar variáveis físicas de químicas, o protocolo de caracterização hídrica em matriz inerte utilizou areia de quartzo e água desmineralizada — variando a umidade da seca absoluta até a saturação — com o intuito de verificar se a presença de água induz interferência cruzada ou falsos positivos nas leituras de nutrientes. Por fim, o protocolo de interferência salina foi introduzido como um

ensaio de estresse para quantificar os limites de seletividade da arquitetura eletroquímica do equipamento frente a altas concentrações iônicas não nutricionais.

## 5.2 VALIDAÇÃO INSTRUMENTAL

Nas subseções a seguir, os dados extraídos de cada um destes testes são apresentados, analisados e discutidos, fornecendo a base para a viabilidade do sistema.

### 5.2.1 Validação do pH

O primeiro teste de validação em bancada avaliou a acurácia do sensor de pH, conforme o protocolo descrito na seção 4.3.1. Durante o ensaio inicial com as soluções de referência, observou-se que as leituras brutas do sensor apresentavam um desvio linear e consistente. O sensor registrou um valor médio de 6.0 para a solução padrão de pH 7.0 e um valor médio de 3.0 para a solução padrão de pH 4.0.

Este comportamento linear, com um *span* correto (diferença de 3.0 pH entre as leituras) mas com um desvio de -1.0, permitiu a aplicação de uma calibração de dois pontos. Com base nestes dados, foi calculada a equação de correção linear (Y = 1.0*X + 1.0) e esta foi implementada diretamente no firmware do ESP32.

Após a aplicação da calibração, o sensor foi novamente submetido aos tampões para verificação. Conforme a metodologia, foi aguardado um período de 10 a 15 segundos para a estabilização eletroquímica do sensor. Para quantificar rigorosamente o desvio de precisão do instrumento em relação aos padrões adotados, aplicou-se a métrica de Erro Relativo Percentual $E_R$. O cálculo foi realizado para cada ponto de aferição (pH 4,0 e pH 7,0), utilizando a equação 3.

$$E_R(\%) = \left| \frac{(Y_{med} - X_{ref})}{X_{ref}} \right| * 100 \quad (3)$$

Onde $Y_{med}$ corresponde à média aritmética das leituras estabilizadas obtidas pelo sensor (pós-calibração) e $X_{ref}$ representa o valor nominal exato da solução tampão certificada. A Tabela 10 compila os resultados observados, registrando a média das leituras estabilizadas e a faixa de variação observada.

**Tabela 10** - Resultados do Teste de pH

| Sol. Tampão | Valor Esperado | Média (Leitura Bruta) | Média (Pós-Calibração) | Faixa Observada (Pós-Calibração) | Desvio Máximo Final |
|---|---|---|---|---|---|
| Neutro | 7,00 | 6,0 | 7,00 | 6,8-7,3 | –0,20 / +0,30 |
| Ácido | 4,00 | 3,0 | 4,00 | 3,8-4,2 | -0,20/+0,20 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Os dados apresentados na Tabela 10 demonstram que, após a aplicação da calibração de dois pontos, o sistema exibe alta acurácia e conformidade com os valores de referência.
É importante notar que, mesmo após a calibração, as leituras do sensor apresentaram uma pequena flutuação natural. A leitura para o tampão de pH 7,0, por exemplo, estabilizou-se em uma média de 7.1, com leituras variando na faixa de 6,8 a 7,3. Similarmente, a leitura para o tampão de pH 4.0 estabilizou-se em uma média de 4,00, com variação na faixa de 3,8 a 4,2.

Os resultados obtidos reforçam dois pontos centrais. Primeiro, mostram que o método de calibração implementado no ESP32 foi de fato eficaz, corrigindo o desvio linear originalmente observado no sensor e aproximando as leituras dos valores de referência. Segundo, indicam que, uma vez ajustado, o sensor passa a operar dentro de uma faixa de precisão satisfatória, já que os desvios finais permanecem abaixo do limite de diferença informado pelo próprio fabricante.

Apesar do desvio inicial relativamente elevado apresentado pelo equipamento, a calibração aplicada por software mostrou-se suficiente para estabilizar as medições e garantir sua confiabilidade. Os resultados demonstram que, nas condições controladas de bancada avaliadas, a calibração de dois pontos foi capaz de reduzir o desvio das leituras e manter os valores dentro da tolerância considerada.

### 5.2.2 Validação do Sensor de CE

O segundo ensaio de bancada avaliou a linearidade da resposta do sensor de CE, conforme protocolo da seção 4.3.2. As leituras do protótipo foram comparadas com os valores teóricos das soluções padrão de KCl, e os resultados estão compilados na Tabela 11.

**Tabela 11** - Resultados Teste CE

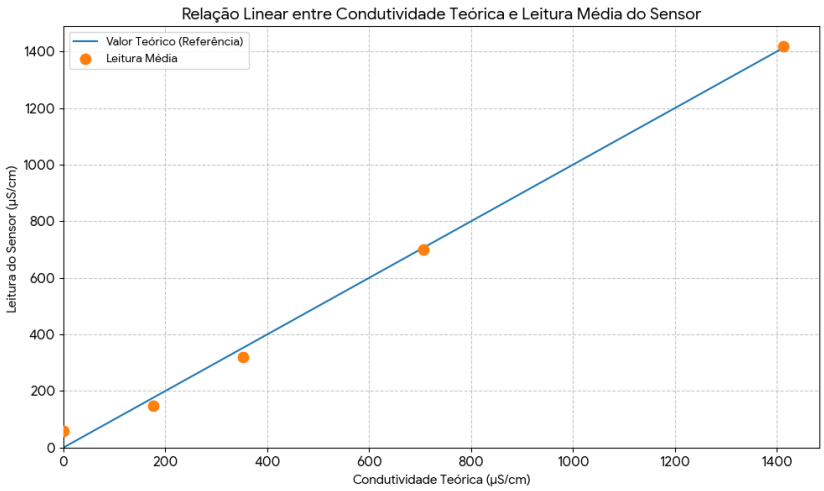
| Padrão (Amostra) | Valor Teórico (us/cm) | Leitura Média (us/cm) | Erro Relativo (%) |
|---|---|---|---|
| Padrão 0 (Água Pura) | 0 | 60 | X |
| Padrão 1 (Diluição 1:8) | 177 | 149 | 15,8% |
| Padrão 2 (Diluição 1:4) | 353 | 320 | 9,35% |

| | | | |
|---|---|---|---|
| Padrão 3 (Diluição 1:2) | 707 | 700 | 0,99% |
| Padrão 4 (Solução-Mãe) | 1413 | 1418 | 0,35% |
| Erro Quadrático Médio (RMSE) | | | 33,31 $\mu S/cm$ |

Fonte: elaborado pelo autor.

Para avaliar a linearidade, os dados da Tabela 11 foram plotados em um gráfico de dispersão, a Figura 16 ilustra a comparação do valor esperado com o valor real.

**Figura 16** - Gráfico da Relação Linear entre Condutividade Teórica e Leitura Média do Sensor




Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados do teste de CE demonstram uma performance ótima do protótipo. A Figura 16 mostra visualmente que os pontos de regressão dos dados (laranja) estão quase perfeitamente sobrepostos à linha de referência ideal (azul), indicando altíssima acurácia.

O coeficiente de determinação ($R^2$) obtido foi de 0.9956, um valor que indica uma linearidade quase perfeita. Isso prova que o sensor responde de forma consistente e previsível em toda a sua faixa de operação. Para complementar a análise de linearidade e quantificar o erro global do instrumento de borda de forma absoluta ao longo de toda a curva de calibração multifatorial, calculou-se o Erro Quadrático Médio (RMSE) das leituras. O RMSE penaliza desvios maiores e traduz a magnitude do erro na mesma unidade da medição original ($\mu S/cm$), fornecendo uma estimativa realista da incerteza média esperada em campo para o sensor de CE. O cálculo fundamenta-se na equação 4.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)^2} \quad (4)$$

Onde $n$ representa o número de pontos na curva de diluição, $Y_i$ é o valor lido e computado pelo protótipo no ponto $i$, e $X_i$ é o valor teórico/esperado da concentração de KCl na diluição correspondente.

No ponto de calibração principal (Solução-Mãe), o valor teórico era 1413 µS/cm e o sensor registrou uma média de 1418 µS/cm, representando um erro percentual de apenas 0,35%.
A leitura de aproximadamente 60 µS/cm obtida para a água desmineralizada (Padrão 0) pode estar relacionada às próprias condições da amostra utilizada. Mesmo em laboratório, é comum que a água considerada "desmineralizada" apresente algum nível residual de íons devido ao contato com o ambiente, ao recipiente ou ao próprio processo de purificação. Por isso, esse valor não necessariamente representa um erro do sensor, mas pode simplesmente refletir a condutividade real da água no momento do teste. A equação de calibração linear derivada dos dados (Y = 1.006 * X - 2.57) é tão próxima da equação ideal (Y = 1.0 * X) que se conclui que o sensor praticamente não requer calibração de software, sendo preciso por padrão.

Este elevado nível de linearidade em equipamentos de baixo custo corrobora os achados recentes da literatura técnica (Sulaeman, 2024), demonstrando que sensores baseados em RS485 são altamente confiáveis para o monitoramento de variáveis elétricas basilares, suportando a tomada de decisão espacial no campo.

O coeficiente de determinação ($R^2 = 0,99$) atesta a alta linearidade do sensor ao longo do intervalo de 0 a 1413 µS/cm, indicando que a função de transferência do transdutor obedece a um comportamento proporcional previsível. A sensibilidade do instrumento de borda correspondeu à inclinação da curva de calibração obtida (S = 1,006 µS/cm medido por µS/cm de entrada). Contudo, linearidade elevada não deve ser confundida com acurácia homogênea em toda a escala. A acurácia variou ao longo da faixa avaliada: enquanto na região de concentração intermediária a alta (700 a 1413 µS/cm) o erro relativo foi inferior a 1%, na região de diluição mais baixa (177 µS/cm) o erro relativo subiu para 15,8%, resultando no Erro Quadrático Médio global de 33,31 µS/cm demonstrado na Tabela 11. A precisão foi verificada pela baixa dispersão das 10 réplicas consecutivas para cada amostra em condições idênticas.

### 5.2.3 Análise de Resposta à Variação de Umidade em Matriz de Solo

O ensaio de caracterização da resposta à umidade gerou dados fundamentais para compreender o comportamento do sensor Halisense em condições controladas. A Tabela 12 apresenta a

síntese das médias obtidas em cada estágio do experimento, correlacionando o volume de água adicionado com as variáveis monitoradas.

**Tabela 12** - Médias das leituras do sensor em função do volume de água em matriz de quartzo

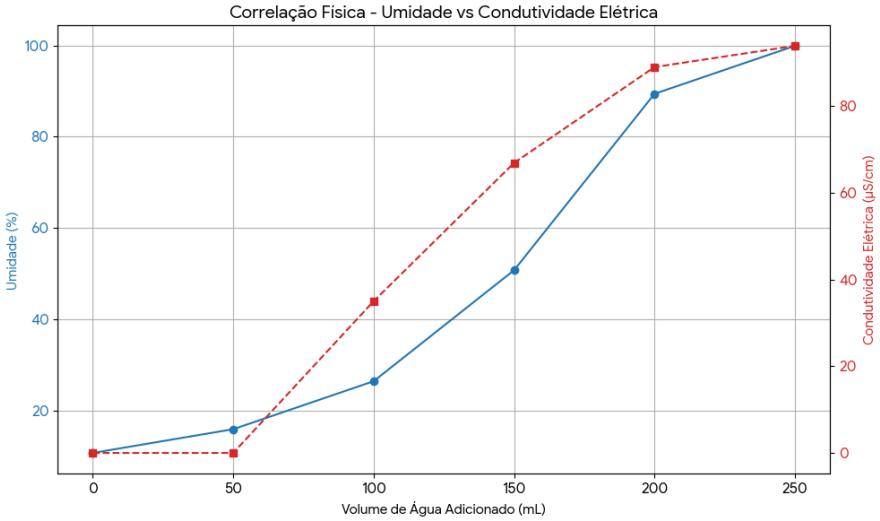
| Volume de Água mL | Umidade % | Temp °C | CE µS/cm | pH | N mg/kg | P mg/kg | K mg/kg |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 (Seco) | 10,8 | 35,3 | 0 | 6,08 | 0 | 0 | 0 |
| 50 | 16 | 34,4 | 0 | 7,69 | 0 | 0 | 0 |
| 100 | 26,5 | 34 | 35 | 7,37 | 0 | 0 | 0 |
| 150 | 50,8 | 33,6 | 66,9 | 8,54 | 0 | 0 | 0 |
| 200 | 89,4 | 33,5 | 89 | 8,37 | 0 | 0 | 0 |
| 250 (Saturação) | 99,9 | 33,3 | 93,9 | 8,27 | 0 | 2 | 0 |

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise detalhada dos dados obtidos neste ensaio revela, primeiramente, a robustez do sistema quanto à seletividade dos sensores de nutrientes. O resultado mais significativo observou-se na estabilidade das leituras de Nitrogênio (N) e Potássio (K), que se mantiveram inalteradas em 0 mg/kg durante todo o experimento, independentemente do incremento de umidade. A única exceção foi uma leitura isolada de Fósforo (P) de 2 mg/kg no ponto de saturação máxima (250 mL), variação que pode ser atribuída a um ruído instrumental no limiar de detecção do equipamento. Esses dados corroboram a confiabilidade do hardware, demonstrando que o aumento da umidade, por si só, não induz "falsos positivos" na detecção de macronutrientes quando estes estão ausentes no solo.

Em contrapartida à inércia química observada nos nutrientes, a CE apresentou um comportamento dinâmico diretamente correlacionado ao teor de água. Para ilustrar a dependência física entre estas variáveis, a Figura 17 apresenta a evolução conjunta da umidade e da condutividade elétrica ao longo dos incrementos de volume de água realizados no ensaio.

**Figura 17** - Correlação Física - Umidade vs Condutividade Elétrica




Fonte: Elaborado pelo autor

A análise visual da Figura 17 confirma que, embora a CE tenha permanecido nula nos estágios iniciais de baixa umidade (até 16%), ela iniciou uma ascensão progressiva e proporcional a partir da adição de 100 mL (26,5% de umidade), atingindo o pico de 93,90 µS/cm no ponto de saturação. As curvas demonstram que, mesmo utilizando água desmineralizada e areia inerte, a elevação da umidade altera a constante dielétrica do meio e facilita a mobilidade iônica residual. Este dado, evidenciado pelo paralelismo das linhas no gráfico, é crucial para a aplicação em campo, pois quantifica a "CE basal" de origem puramente hídrica que deve ser considerada na calibração do sistema.

Por fim, o comportamento do pH caracterizou-se por flutuações entre 6,08 e 8,54. Esta instabilidade não indica falha no sensor, mas é tecnicamente justificável pela baixíssima força iônica da solução de teste (água desmineralizada), que não fornece íons suficientes para estabilizar o potencial eletroquímico na membrana de leitura. Em resumo, o ensaio em matriz inerte validou a capacidade do sistema de isolar eficientemente as variáveis de fertilidade da variável umidade, confirmando a aptidão do protótipo para pesquisas agrícolas onde a diferença precisa entre a presença de água e a disponibilidade de nutrientes é essencial.

### 5.2.4 Teste de Interferência Salina nas Leituras de Nutrientes

Para aprofundar a validação instrumental e apontar as reais limitações da arquitetura de baixo custo em relação a análises laboratoriais complexas, foi conduzido o ensaio de estresse salino.

O objetivo consistiu em verificar a robustez e a seletividade da inferência de NPK do sensor frente a ambientes com alta condutividade não atrelada a fertilizantes.

Conforme estabelecido no protocolo metodológico, o sensor foi imerso em uma matriz de areia úmida submetida a uma carga de aproximadamente 7 gramas de Cloreto de Sódio (NaCl). Como o sal comum é estritamente isento de macronutrientes (N, P ou K), em um cenário analítico ideal, os índices nutricionais deveriam permanecer inalterados (nulos), enquanto apenas a variável de CE apresentaria elevação proporcional à diluição iônica. No entanto, a análise dos dados extraídos evidenciou uma limitação crítica na seletividade do equipamento. Após o período de estabilização de 15 minutos, a CE da amostra registrou um salto abrupto, estabilizando-se em 5419 µS/cm. Em decorrência direta dessa variação de força iônica, os indicadores de macronutrientes acompanharam o pico de condutividade de forma colinear, resultando em falsos positivos massivos. O sistema reportou uma leitura irreal de 1092 mg/kg para Nitrogênio (N). De forma ainda mais extrema, as variáveis de Fósforo (P) e Potássio (K) atingiram leituras simultâneas e travadas no valor de 1999 mg/kg. Esse platô numérico exato evidência não apenas a dependência algorítmica da CE, mas o próprio teto de saturação operacional (*overflow*) programado no *firmware* do sensor comercial para as variáveis de fertilidade.

Os resultados obtidos no ensaio de estresse iônico induzido por NaCl evidenciaram uma importante limitação operacional e conceitual do sensor multiparamétrico comercial utilizado. Após a adição de 7 g de NaCl à matriz inerte de areia de quartzo, observou-se uma elevação nas leituras dos macronutrientes Nitrogênio, Fósforo e Potássio no aplicativo móvel, gerando falsos positivos. Essa anomalia é explicada pelo princípio físico de funcionamento de sensores de solo integrados de baixo custo. Diferentemente de equipamentos laboratoriais ou sondas de alto custo que utilizam Eletrodos Íon-Seletivos (ISE) baseados em membranas poliméricas sensíveis a íons específicos, o hardware avaliado realiza uma leitura indireta. O dispositivo possui eletrodos galvânicos de aço inoxidável que medem estritamente a Condutividade Elétrica global da solução do solo através da impedância do meio. Os valores individuais de N, P e K exibidos pelo sensor são, na realidade, derivados de uma aproximação matemática linearizada codificada no próprio firmware do fabricante, mapeada sob a premissa de que a condutividade do meio advém majoritariamente de uma solução nutricional equilibrada. Ao introduzir NaCl, a dissociação iônica dos elementos Na+ e Cl- elevou a força iônica e a CE do sistema. Como o algoritmo do hardware é incapaz de discriminar as espécies químicas presentes na fase líquida, o aumento na condutividade não nutricional foi interpretado erroneamente como um incremento nas concentrações de macronutrientes. Portanto, comprova-se que o

ecossistema proposto possui aplicabilidade para o monitoramento de tendências e dinâmicas de salinidade total, mas suas leituras de NPK devem ser tratadas como indicadores de condutividade equivalente, confirmando a justificativa inicial deste trabalho de que a ferramenta atua de forma complementar às análises químicas laboratoriais clássicas.

Este comportamento expõe a principal restrição arquitetural dos sensores multiparamétricos de contato galvânico de baixo custo baseados no protocolo Modbus. Tais dispositivos não realizam espectroscopia óptica real, tampouco utilizam eletrodos de íon-seletivo (ISE) *in loco*. A incapacidade de isolar a leitura quantitativa de macronutrientes em meios de alta condutividade evidencia uma limitação técnica inerente ao sensoriamento galvânico genérico, comportamento estrutural já mapeado e corroborado pela literatura sobre instrumentação agrícola acessível (Sulaeman, 2024). Em vez de análises químicas diretas, esses sensores dependem de modelos inferenciais embutidos em seus microcontroladores que calculam os níveis de NPK a partir de uma forte correlação matemática com a condutividade elétrica global da solução do solo.

Portanto, em solos inerentemente salinos ou áreas fertirrigadas com compostos não nutricionais que elevem drasticamente a condutividade, o equipamento fornecerá leituras de macronutrientes severamente superestimadas. Esta constatação empírica exige que a tecnologia proposta não substitua testes laboratoriais para a quantificação química absoluta. A sua aplicação deve ser delimitada de forma estratégica, atuando como um monitor de tendência temporal relativa e espacial em áreas previamente mapeadas, visando o acompanhamento de lixiviação pós-adubação.

## 5.3 PROTÓTIPO DE HARDWARE: CUSTOS E COMPARAÇÃO COM A LITERATURA

O primeiro resultado tangível do projeto é o protótipo de hardware funcional para coleta de dados em campo. Conforme detalhado visualmente no Apêndice C, a implementação física adotou uma montagem modular em placa perfurada, com técnica de barramento para alimentação, acondicionada em uma caixa hermética (IP67) visando a proteção contra intempéries durante a aplicação real.

A escolha de componentes comerciais, como o microcontrolador ESP32 e o módulo GPS NEO-6M, resultou em um dispositivo cujo custo de replicação é significativamente inferior ao de soluções industriais equivalentes. Esta abordagem ataca diretamente o desafio do alto custo de

equipamentos, um dos principais entraves para a adoção de tecnologias digitais na pesquisa agrícola, conforme apontado por Ribeiro et al. (2023).

Enquanto equipamentos proprietários de aferição de solo e dataloggers comerciais frequentemente exigem orçamentos na casa de milhares de reais por ponto de coleta, a arquitetura proposta democratiza o acesso a essas tecnologias em pesquisas com financiamento limitado.

### 5.3.1 Análise Comparativa de Custos da Solução Proposta

Este trabalho se propõe a demonstrar, empiricamente e financeiramente, o impacto da aplicação de componentes relativamente mais acessíveis e plataformas open-source.

A Tabela 13 detalha a lista de materiais exata do protótipo desenvolvido nesta dissertação, baseada nos valores de varejo de componentes eletrônicos ao final de 2025.

**Tabela 13** - Detalhamento de Custos do Protótipo de Hardware

| Componente | Função | Custo Aproximado (R$) |
|---|---|---|
| ESP32 | Processamento central e comunicação BLE | 45,00 |
| Sensor Halisense 7 em 1 | Leitura multiparamétrica do solo | 280,00 |
| Módulo GPS NEO-6M | Georreferenciamento espacial | 40,00 |
| Sensor DHT11 | Leitura microclimática | 15,00 |
| Subsistema de Energia | Bateria 18650 e MT3608 | 35,00 |
| Infraestrutura | Placa perfurada, caixa hermética IP67 e cabos | 65,00 |
| Custo Total Estimado | | ~480,00 |

Fonte: elaborado pelo Autor.

Nota: Valores baseados no mercado nacional e plataformas de importação eletrônica (ex: MercadoLivre, UsinaInfo, AliExpress).

Para que o valor de ~R$ 480,00 (aprox. $100 USD) seja contextualizado, é necessário compará-lo diretamente com as alternativas disponíveis na indústria e as práticas tradicionais em agronomia.

#### *5.3.1.1 Sondas Estacionárias de Monitoramento Contínuo*

As referências de mercado na pesquisa agrícola são dominadas por empresas como a METER Group e a Sentek. O sensor TEROS 12, amplamente utilizado para medir umidade, temperatura e CE com grande precisão, possui um custo de aquisição apenas da haste sensora de aproximadamente $271,00 USD (cerca de R$ 1.500,00 sem taxas de importação). Contudo, a sonda é inutilizável sem um datalogger proprietário (como o RS10 ou ZL6), cujo valor ultrapassa $1.120,00 USD. Isso eleva o custo de um *único* ponto de monitoramento no campo para perto de $1.400 USD (R$ 8.000,00). De forma similar, sondas de perfil da Sentek (Drill & Drop) custam a partir de $1.250,00 USD. Nenhuma dessas sondas super premium aufere parâmetros nutricionais ou pH de forma direta e contínua e permite a governança de informações, tudo isso teria que ser feito a parte em outro sistema.

#### *5.3.1.2 Equipamentos Portáteis Manuais*

Outra abordagem comum é a utilização de *testers* pontuais. A renomada linha GroLine da Hanna Instruments oferece o medidor portátil HI98331 (Condutividade e Temperatura) por cerca de R$1.049, enquanto a caneta específica para pH de solo (HI981030) custa R$1.100. A aquisição de ambos supera R$ 2.100. Equipamentos nacionais como o Falker HidroFarm aferem com robustez apenas a umidade volumétrica, mas estão situados em faixas financeiras que fogem ao orçamento de pequenos produtores.

#### *5.3.1.3 Soluções Portáteis Baseadas em Espectroscopia*

Um exemplo é a Stenon FarmLab, que realiza análises instantâneas de solo por meio da combinação de sensores ópticos e impedância elétrica. Embora o custo por análise seja estimado entre €3 e €4, o valor de aquisição do equipamento não é amplamente divulgado, sendo comercializado diretamente pela empresa. Além disso, a solução pode envolver custos recorrentes relacionados ao processamento e gerenciamento dos dados. Essas características tornam a tecnologia mais adequada para grandes propriedades, consultorias e empresas agrícolas do que para pequenos produtores.

#### *5.3.1.4 Custo Laboratorial de Análise*

Métodos convencionais destrutivos exigem a remoção de terra e envio a laboratórios. Uma análise de rotina (macro + micronutrientes) custa em média de R$ 50,00 a R$ 80,00 por amostra. Embora altamente precisa, a técnica laboratorial não oferece a dinâmica temporal da fazenda.

#### *5.3.1.5 Solução Proposta*

O modelo proposto nesta tese consiste no uso nativo da barreira RS485 para acoplar um sensor industrial genérico a um ESP32. Por R$ 480,00, o pesquisador obtém geolocalização e 10 parâmetros contínuos. O baixo custo possibilita a transição de um monitoramento pontual (um sensor de R$ 8.000,00 para um hectare inteiro) para uma coleta contínua em diferentes pontos, formando uma malha espacial densa, permitindo *insights* pontuais e mapas de calor em tempo real.

**Tabela 14** - Matriz Comparativa de Custos, Recursos e Implicações Logísticas (Sistemas Comerciais x Protótipo IoT)

| Sistema/Produto | Fabricante | Custo Recorrente | Parâmetros Monitorados | Público-Alvo |
|---|---|---|---|---|
| Sistema Proposto | ~R$480,00 | Não possui, em baixa escala. | NPK, pH, CE, Umidade, Temp. (Solo/Ar), GPS | Pesquisadores, agrônomos e pequenos produtores |
| Teros 12 + Datalogg | ~R$ 8.000 | Eventuais licenças e serviços | Umid. Volumétrica (70MHz), Temp., CE | Pesquisa e agricultura de precisão |
| Drill & Drop (Sonda 60cm) | > R$ 7.000 | Dependente da solução adotada | Umidade, Temperatura (Multi-nível 10cm) | Grandes propriedades |
| Kit GroLine | ~R$ 2.100 | Não possui | Condutividade Elétrica, Temperatura, pH | Técnicos e agrônomos |
| Falker HidroFarm | > R$ 2.000 | Não possui | Umidade volumétrica | Agricultura profissional |
| Stenon FarmLab | Valor sob consulta | €3–€4 por análise ou planos de serviço | Nutrientes, pH e umidade. | Grandes produtores e consultorias |
| Análise Laboratorial | Sem investimento inicial | R$ 50–80 por amostra | Macro e micronutrientes, pH e outros | Pesquisa e recomendação agronômica |

Fonte: Elaborado pelo autor

## 5.4 ESTUDO DE CASO: GOVERNANÇA DE DADOS VIA APLICATIVO MÓVEL

O segundo resultado deste projeto foi a implementação do aplicativo móvel, que atua como a interface central para o gerenciamento, coleta e análise dos dados. Desenvolvido em Dart/Flutter, o aplicativo materializa a arquitetura de software planejada na metodologia, focando em robustez e usabilidade em campo. Para garantir sua manutenibilidade e escalabilidade, a adoção da Clean Architecture e do padrão MVVM foi uma decisão estratégica. Essa abordagem desacopla as regras de negócio da interface e de frameworks externos, permitindo que o sistema evolua sem a necessidade de refatorações complexas.

Em vez de simplesmente exibir informações estáticas, o aplicativo foi projetado como uma ferramenta estratégica de governança de dados para solucionar problemas reais enfrentados pelos agrônomos e pesquisadores em campo. O aplicativo implementa um sistema de gerenciamento de pesquisas, permitindo ao usuário cadastrar projetos, definir parcelas experimentais e associar coletas específicas a cada parcela.

A funcionalidade central de coleta de dados, ilustrada nas Figuras 18 e 19, permite que o aplicativo se conecte diretamente ao protótipo de hardware por meio de BLE. Uma vez estabelecida a conexão, as leituras das variáveis do solo são apresentadas em tempo real, oferecendo ao usuário uma visualização imediata dos parâmetros capturados pelos sensores após o clique no botão “Realizar Leitura”.

**Figura 18** – *Pop-up* para conexão BLE




Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

**Figura 19** - Tela Realizar Coleta




Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

O maior obstáculo na adoção de tecnologias de campo na América Latina é a ausência de conectividade 4G ou Wi-Fi na maior parte das áreas de plantio. Sistemas comerciais muitas vezes dependem de envios contínuos para a nuvem. O aplicativo desenvolvido contorna essa limitação aplicando a filosofia offline-first.

### 5.4.1 Estudo de Caso Prático

Um pesquisador desloca-se a uma área experimental isolada (ex: uma parcela no cerrado) para verificar a eficácia de um novo fertilizante nitrogenado. Ao chegar à "Parcela 01", contendo apenas o smartphone e sem sinal de internet, ele abre o aplicativo e conecta-se ao protótipo via BLE. Quando clicar em “Realizar Leitura”, imediatamente o aplicativo dispara o comando via *Modbus*, obtém as leituras das variáveis de solo e ambiente, e os dados do GPS local.

Se no local não possuir internet, o aplicativo salva essas informações no banco de dados relacional embarcado (*SQLite*). O pesquisador pode analisar visualmente a carga nutricional na tela, tomar a decisão agronômica se a irrigação deve ser ajustada no momento e prosseguir.

Apenas ao retornar ao laboratório ou à sede da fazenda, com acesso a Wi-Fi, ele utiliza a "Tela de Sincronização" (Figura 20) para despachar o lote de coletas de forma segura para o *Google Cloud Firestore*. Essa arquitetura assegura tolerância a falhas, garantindo que nenhum dado seja perdido no trajeto e abolindo a necessidade de anotações em pranchetas de papel, minimizando erros ao transcrever.

A validação prática da resiliência da arquitetura local foi conduzida por meio de ensaios sem conectividade com a internet. A garantia de que nenhum dado foi perdido decorre do emprego de transações atômicas compatíveis com o padrão *ACID* no *SQLite*.

O algoritmo de sincronização foi modelado com propriedades de idempotência, cada leitura persistida localmente recebe um identificador determinístico. No momento da conexão, as operações de escrita no *Google Cloud Firestore* utilizam chaves explícitas baseadas nesse mesmo identificador, garantindo que retransmissões decorrentes de interrupções de sinal atualizem ou confirmem o registro sem duplicar tuplas no banco de dados em nuvem. Além disso, destaca-se que no contexto da pesquisa agronômica em campo, a latência de sincronização remota não é um fator crítico. A tomada de decisão imediata do pesquisador ocorre no local da coleta através do próprio aplicativo, que lê os dados do SQLite instantaneamente. A postergação do envio à nuvem por horas ou dias não degrada o valor do

registro georreferenciado, confirmando a robustez da arquitetura para cenários de isolamento digital prolongado.

**Figura 20** – Tela de Sincronização dos Dados




Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

A transição do dado bruto para a informação visual é essencial. O aplicativo não atua apenas como um gravador, mas como uma plataforma analítica preliminar. Os dados coletados são então processados e exibidos em dashboards de análise, como demonstrado na Figura 21 e Figura 22, permitindo a visualização de tendências e a comparação gráfica entre parcelas.

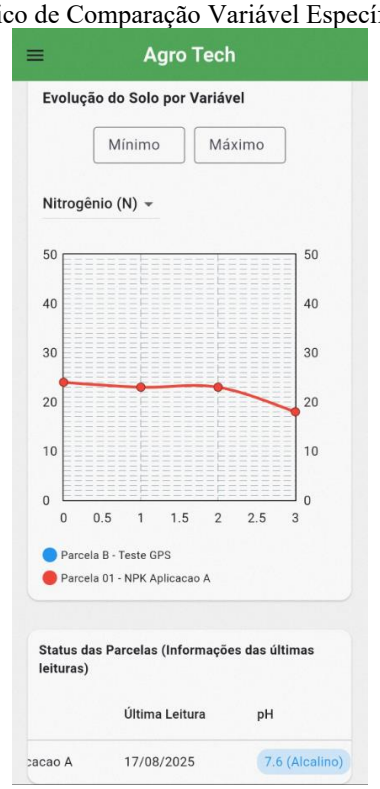
Por meio do Dashboard de Pesquisa (Figura 21), o sistema compila médias automáticas, máximas e mínimas. Isso permite ao pesquisador identificar imediatamente anomalias macroclimáticas, como um estresse térmico generalizado no solo do lote analisado. A funcionalidade de comparar variáveis específicas entre parcelas (Figura 22) confere grande agilidade ao método científico. Se a "Parcela 01" recebeu o adubo A e a "Parcela 02" (controle) não, a visualização gráfica lado a lado do Nitrogênio e da CE permite validar a eficiência da aplicação e monitorar taxas de lixiviação sem precisar aguardar o processamento estatístico em softwares de terceiros.

**Figura 21** - Dashboard da pesquisa




Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

**Figura 22** – Gráfico de Comparação Variável Específica entre Parcelas

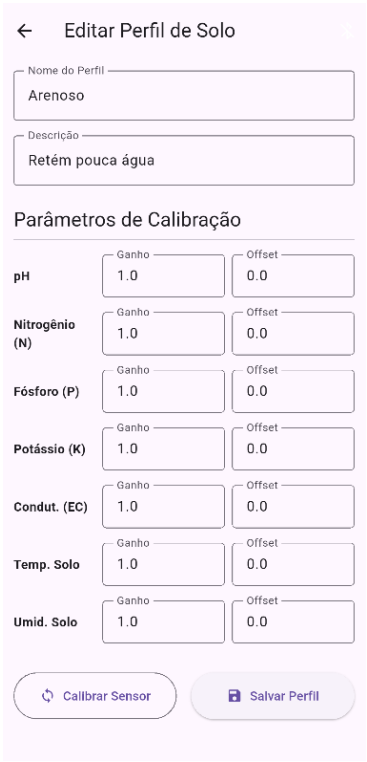



Fonte: Elaborado pelo autor (2025)

Um diferencial chave do sistema é o módulo de calibração, ilustrado na Figura 23. Esta funcionalidade permite ao usuário criar e salvar diferentes perfis de solo, ajustando os parâmetros de "Ganho" (A) e "Offset" (B) conforme a Equação 1. Isso possibilita que o sistema

seja adaptado às características físico-químicas de diferentes solos, refinando a acurácia das medições.

**Figura** 23 – Interface de calibração do sensor por perfil de solo




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Essa autonomia gerada pelo aplicativo significa que o custo associado à assinatura de softwares proprietários SaaS (comum nos modelos de negócios de grandes corporações) é completamente eliminado, mantendo o controle algorítmico nas mãos da academia ou do pequeno produtor.

O aplicativo desenvolvido apresenta uma interface intuitiva e funcionalidades para a pesquisa agrícola. A Tabela 15 resume as principais telas e suas respectivas funções, indicando na coluna 'Referência' a localização exata de cada imagem ilustrativa, seja nesta seção ou no Apêndice A.

**Tabela 15** - Telas do Aplicativo

| Tela | Função | Referência no Apêndice |
|---|---|---|
| Tela de Autenticação | Permite o login e cadastro de usuários para garantir acesso seguro ao sistema. | Figura 24 (Apêndice A) |
| Tela de Visualizar Pesquisas | Exibe a lista de pesquisas cadastradas, permitindo ao usuário acessar detalhes, editar informações e acompanhar o andamento das coletas. | Figura 26 (Apêndice A) |
| Tela de Visualizar Parcelas | Apresenta as parcelas associadas a uma pesquisa. | Figura 27 (Apêndice A) |
| Tela de Cadastrar/Editar Parcela | Permite realizar o cadastro ou edição de parcelas. | Figura 28 (Apêndice A) |
| Tela de Conexão BLE | Permite realizar vínculo com o protótipo de leituras. | Figura 18 (Apêndice A) |
| Tela Realizar Coleta | Interface para inserção de dados coletados em campo, registrando as informações dos sensores. | Figura 19 (Apêndice A) |
| Tela de Listar Leituras | Lista apenas as leituras de determinada parcela selecionada. | Figura 29 (Apêndice A) |
| Tela Análise de Pesquisa | Exibe informações e gráficos relacionados a uma pesquisa, facilitando a interpretação dos dados coletados. | Figura 21 |
| Tela de Listagem de Tipos de Solo | Exibe a lista de pesquisas cadastradas, permitindo ao usuário acessar detalhes, editar informações e acompanhar o andamento das coletas. | Figura 30 (Apêndice A) |
| Tela de Cadastro/Edição Tipo de Solo | Interface para inserir novos tipo de solo ou realizar a edição dos existentes. | Figura 23 |
| Tela de Listagem de Produtos | Exibe a lista de produtos cadastrados, permitindo ao usuário acessar detalhes e editar informações. | Figura 31 (Apêndice A) |
| Tela de Listagem de Usuários | Exibe a lista de usuários cadastrados com o nível de permissão de aluno, permitindo ao usuário professor acessar detalhes. | Figura 32 (Apêndice A) |
| Tela de Editar Usuário | Permite alteração do nome e senha dos usuários com permissão de “aluno”. | Figura 33 (Apêndice A) |
| Tela de Pesquisas Disponíveis | Exibe lista de pesquisas ativas e usuários vinculados a ela. | Figura 34 (Apêndice A) |
| Tela de Alocar Usuários | Permite atribuir usuários a pesquisas específicas, definindo permissões de acesso. | Figura 35 (Apêndice A) |
| Tela de Sincronização dos Dados | Configuração de sincronização do aplicativo | Figura 20 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 5.5 LIMITAÇÕES DO SISTEMA PROPOSTO E AS IMPLICAÇÕES DO BAIXO CUSTO

A adoção de tecnologias de baixo custo proporciona uma grande escalabilidade, mas impõe trade-offs tecnológicos que devem ser debatidos quando comparados ao Estado da Arte em instrumentação e a outras pesquisas na literatura.

### 5.5.1 Dependência de Compensação via Software (Calibração)

Como evidenciado nos testes de pH e CE (Seções 5.2.1 e 5.2.2), componentes genéricos possuem *drifts* (desvios de fábrica) que seriam inaceitáveis se usados de forma crua. O baixo custo demanda um investimento intenso em Firmware. O sistema final depende criticamente das calibrações lineares embutidas no código para tornar os valores aceitáveis, enquanto sensores comerciais já trazem circuitos complexos de correção nativa por hardware.

### 5.5.2 Tecnologia Galvânica vs. Alta Frequência

O sensor selecionado utiliza pinos metálicos expostos (contato galvânico direto). Equipamentos acadêmicos e comerciais de alta fidelidade (como o TEROS 12 da Meter Group) utilizam tecnologias de reflexão no domínio da frequência (70 MHz), o que os torna quase totalmente imunes a distorções causadas por variações extremas na salinidade ou na textura do solo. A durabilidade dos eletrodos do sistema proposto a longo prazo, sob forte ataque químico de adubos, tende a ser menor.

### 5.5.3 Natureza Indireta da Leitura de Nutrientes

Conforme constatado no novo teste de estresse salino (Seção 5.2.4), o sistema apresentou vulnerabilidade a interpretações cruzadas. O baixo custo implica que a sonda não abriga um espectrômetro verdadeiro no seu interior. A quantificação de Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) é, na verdade, uma inferência algorítmica atrelada à condutividade elétrica aparente. Se houver salinidade não oriunda de fertilizantes, os indicadores de NPK sofrerão falsos positivos. Na literatura mais recente, autores concordam que sondas RS485 de baixo

custo são excepcionais para medir CE, temperatura e umidade, mas as medições de NPK servem prioritariamente como uma avaliação de tendência relativa pós-adubação, não substituindo o rigor químico da espectroscopia laboratorial.

Diante dos resultados obtidos no ensaio salino, delimita-se que as estimativas de N, P e K fornecidas pelo hardware são confiáveis estritamente para o acompanhamento temporal e relativo em um mesmo talhão homogêneo, em solos sem histórico de salinização e com umidade próxima à capacidade de campo. Para evitar tomadas de decisão agronômicas equivocadas por parte do usuário (como adubações desnecessárias baseadas em falsos positivos), recomenda-se como protocolo de operação que as leituras do sensor sejam tratadas como indicadores qualitativos de tendência pós-adubação, mantendo-se a obrigatoriedade de laudos químicos laboratoriais para recomendações formais de calagem e adubação. Como evolução de software para versões futuras do aplicativo, sugere-se a inclusão de travas lógicas na interface, exibindo alertas de inconsistência caso ocorram picos de condutividade sem registro prévio de aplicação de fertilizantes

### 5.5.4 Implicações Práticas da Estratégia de Baixo Custo

A implicação principal do baixo custo é uma sutil redução na assertividade absoluta de longo prazo, em troca de um colossal ganho na resolução espacial. O sistema proposto não tenta substituir a precisão química fina de uma sonda Sentek de $1.250 USD; em vez disso, propõe modelar a variação espacial tridimensional do solo realizando diferentes coletas estrategicamente distribuídas para conseguir uma inteligência agronômica superior à leitura de um único ponto extremamente caro e geograficamente isolado.

Nesse sentido, a extrapolação e a generalização dos achados experimentais para solos agrícolas reais impõem limites metodológicos bem delineados. A matriz física utilizada nesta pesquisa (areia de quartzo lavada) atuou estritamente como controle negativo e matriz inerte de sustentação mecânica, permitindo isolar a resposta do hardware da complexidade biogeoquímica de um solo natural. Em solos tropicais complexos, como Latossolos e Argissolos, fatores não presentes na areia de quartzo exercem influência expressiva: (i) Efeito mineralógico e CTC: a presença de argilominerais (como caulinita) e sesquióxidos de ferro e alumínio confere ao solo Capacidade de Troca Catiônica (CTC) e superfícies carregadas, alterando a condutância eletroquímica superficial e retardando a mobilidade iônica; (ii) Água livre versus água adsorvida: enquanto na areia de quartzo a quase totalidade da água atua como

água capilar livre com constante dielétrica próxima a 80, em solos argilosos uma fração expressiva da água fica fortemente adsorvida à fração coloidal (água ligada), cuja constante dielétrica reduz-se a valores próximos a 3–5, demandando calibrações dielétricas específicas por textura de solo (funções de pedotransferência); (iii) Tortuosidade dos poros: a curva de retenção de umidade em solos reais não é linear, apresentando histerese física durante ciclos de umedecimento e secamento.

Portanto, os resultados deste trabalho validam a estabilidade metrológica do dispositivo e a ausência de interferências cruzadas basais, mas a acurácia absoluta em campo depende do uso da interface de calibração dinâmica implementada no aplicativo, ajustando o ganho e o offset para o perfil mineralógico da parcela estudada.

# 6 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs o desenvolvimento e a validação de um ecossistema tecnológico integrado para a coleta, governança e análise de dados agronômicos, unindo a instrumentação de borda de baixo custo a uma arquitetura de *software* móvel estruturada. Diante dos desafios de conectividade no ambiente rural e do alto custo das tecnologias comerciais de Agricultura de Precisão, a solução construída demonstrou viabilidade técnica para democratizar o monitoramento contínuo e georreferenciado do solo.

A avaliação do sucesso desta pesquisa fundamenta-se no pleno atendimento aos cinco objetivos específicos delineados no escopo do estudo. A primeira meta, referente à projeção e construção do *hardware* de borda, foi atingida com a integração do microcontrolador ESP32 ao sensor multiparamétrico (7 em 1), ao DHT11 e ao módulo GPS NEO-6M. A adoção do protocolo industrial Modbus RTU em componentes genéricos resultou em um dispositivo viável, capaz de aferir variáveis físico-químicas e ambientais com precisão espacial.

Em sinergia com o desenvolvimento físico, o segundo e o terceiro objetivos foram alcançados mediante a modelagem da aplicação móvel e a implementação da arquitetura de banco de dados distribuída. O aplicativo foi estruturado sob os preceitos da *Clean Architecture* e do padrão MVVM, adotando rigorosamente o paradigma *Offline-First*. A comunicação via *Bluetooth Low Energy* (BLE) garantiu a interação assíncrona, viabilizando a interface de calibração dinâmica embarcada para ajuste de ganho e *offset* diretamente no campo. Paralelamente, a resiliência e a rastreabilidade agronômica foram asseguradas pelo banco de dados relacional local (SQLite), que correlaciona de forma estruturada as leituras às parcelas georreferenciadas e aos produtos aplicados, orquestrando a posterior sincronização com a nuvem (*Google Cloud Firestore*).

Por fim, o quarto e o quinto objetivos consolidaram o ecossistema por meio da visualização de dados e da validação instrumental. O desenvolvimento de *dashboards* e gráficos analíticos na aplicação móvel permitiu a tradução imediata dos dados brutos em representações visuais, facilitando a comparação de tratamentos entre parcelas. Para atestar a confiabilidade da solução de ponta a ponta, o protótipo foi submetido a quatro protocolos de testes de bancada, atestando o funcionamento integrado do sistema.

Do ponto de vista instrumental, os ensaios evidenciaram tanto a eficácia quanto os limites inerentes a sensores genéricos. A Condutividade Elétrica apresentou uma resposta notável, com linearidade quase perfeita ($R^2 = 0,9956$) e erro relativo de apenas 0,35% no ponto

de calibração máxima, qualificando o sistema para estudos de mobilidade iônica e salinidade. O sensor de pH, embora inicialmente apresentasse um desvio linear, obteve acurácia satisfatória após a aplicação do algoritmo de correção de dois pontos via *software*, estabilizando-se dentro das tolerâncias aceitáveis para a pesquisa agrícola.

Além disso, o ensaio em matriz inerte atestou a seletividade hídrica do *hardware*, comprovando que a elevação da umidade altera previsivelmente a condutividade dielétrica, mas não gera falsos positivos para macronutrientes na ausência destes. No entanto, o teste de estresse salino expôs uma limitação eletroquímica crítica: sensores de contato galvânico de baixo custo baseiam suas leituras de NPK em inferências fortemente correlacionadas à condutividade elétrica global. Constatou-se que, em cenários de alta salinidade não nutricional, o sistema pode superestimar os níveis de macronutrientes.

Logo, conclui-se que o equipamento não substitui a espectroscopia laboratorial para quantificação absoluta, mas atua como uma excelente ferramenta de alta resolução espacial e temporal para o monitoramento de tendências relativas pós-adubação.

No que tange à Engenharia de *Software*, o sistema configurar-se como uma plataforma robusta de governança. O isolamento de domínio promovido pela *Clean Architecture* e a separação de responsabilidades asseguram que as regras de negócio permaneçam independentes da infraestrutura de nuvem ou do protocolo físico do sensor. Isso confere à solução um alto grau de manutenibilidade, permitindo a futura substituição de *hardwares* sem a necessidade de refatoração do *core* do aplicativo.

Como continuidade deste estudo, recomenda-se a realização de ensaios longitudinais *in situ* em solos com diferentes perfis pedológicos, com o cruzamento das leituras obtidas pelo sistema com análises laboratoriais de referência. Esses experimentos permitirão ampliar a caracterização do comportamento do sensor em condições reais de campo e avaliar, de forma mais abrangente, a influência das propriedades físicas e químicas da matriz sobre as leituras realizadas.

Nesse contexto, destaca-se a necessidade de aprofundar a investigação da relação entre o teor de umidade e a condutividade elétrica. Os resultados obtidos em matriz inerte demonstraram que o aumento da umidade esteve associado a uma elevação sistemática da CE, enquanto as leituras de Nitrogênio e Potássio permaneceram essencialmente estáveis nas condições avaliadas. Embora esse resultado não permita afirmar que a umidade produza diretamente erros nas estimativas de nutrientes, ele indica que a condição hídrica da matriz pode constituir uma variável relevante para a interpretação da resposta elétrica do sensor.

Como evolução dessa abordagem, propõe-se investigar modelos de compensação que considerem simultaneamente a condutividade elétrica, o teor de umidade e as características do perfil de solo. Conceitualmente, a estimativa dos nutrientes poderia ser representada por uma função multivariada, conforme a Equação 5.

$$NPK_{estimado} = f(CE, U, S) \quad (5)$$

em que CE representa a condutividade elétrica medida pelo sensor, U representa o teor de umidade e S representa as características do perfil físico-químico do solo. A forma funcional dessa relação deverá ser determinada experimentalmente, não sendo possível assumir, a priori, uma relação proporcional ou linear entre essas variáveis.

A validação dessa abordagem deverá considerar diferentes tipos de solo, concentrações conhecidas de nutrientes e níveis controlados de umidade, tendo como referência análises laboratoriais. Esses ensaios poderão determinar se a inclusão da umidade como variável auxiliar reduz os erros de estimativa e aumenta a estabilidade das leituras de NPK sob diferentes condições hídricas. Caso os resultados sejam favoráveis, o modelo poderá ser incorporado ao mecanismo de calibração por perfil de solo já disponibilizado no aplicativo desenvolvido neste trabalho.

Como perspectiva futura para o aprimoramento algorítmico da calibração multivariada, sugere-se a investigação de modelos baseados em Regressão Bayesiana. Em cenários práticos de campo onde a condutividade elétrica do solo sofre interferências iônicas não nutricionais (como variações de salinidade ou textura), modelos puramente determinísticos tendem a gerar falsos positivos. Uma abordagem bayesiana permitiria incorporar as informações prévias da parcela (como análises laboratoriais basais salvas no aplicativo) como uma distribuição a priori (*Prior*), refinando a estimativa a posteriori e fornecendo um intervalo de credibilidade para a medição. Dessa forma, futuros trabalhos poderão quantificar a incerteza da inferência de NPK diretamente na camada de software, aumentando a robustez analítica do ecossistema.

Por fim, a ampliação da base histórica de dados gerada pelo sistema poderá permitir, em estudos posteriores, o desenvolvimento de modelos preditivos voltados à identificação de padrões temporais e à antecipação de processos como a lixiviação de nutrientes, considerando também as variáveis microclimáticas registradas pelo sistema.

No geral, a solução integrada desenvolvida atinge um equilíbrio técnico entre acessibilidade financeira e rigor metodológico. Ao unificar a instrumentação parametrizada à persistência resiliente, o sistema democratiza o acesso a ferramentas de precisão, oferecendo a

pesquisadores e agrônomos uma arquitetura validada para o planejamento, controle e rastreabilidade da experimentação agrícola.

# REFERÊNCIAS

ARCHBOLD, G. et al. pH measurement IoT system for precision agriculture applications. **IEEE Latin America Transactions**, v. 17, n. 5, p. 823-832, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8891951. Acesso em: 15 ago. 2025.

ARTUZO, F. D. et al. Agricultura de precisão: inovação para a produção mundial de alimentos e otimização de insumos agrícolas. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 13, n. 29, 2017. Disponível em: https://doi.org/10.3895/rts.v13n29.4755. Acesso em: 15 ago. 2025.

BEHERA, S. K. et al. The scope for using proximal soil sensing by the farmers of India. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 14, p. 8561, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.3390/su14148561. Acesso em: 15 ago. 2025.

BORGES, J. R. P. et al. Análise da importância do pronaf para os agricultores familiares. **Revista Expressão Católica**, v. 7, n. 1, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.25190/rec.v7i1.2065. Acesso em: 15 ago. 2025.

BORGES, L. R. M. et al. Agricultura de precisão: ferramenta de gestão na rentabilidade e produtividade de grãos. **Scientific Electronic Archives**, v. 15, n. 3, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.36560/15320221520. Acesso em: 15 ago. 2025.

CHICAIZA, K. et al. Smart Farming Technologies: A Methodological Overview and Analysis. **IEEE Access**, v. 12, p. 13456-13480, jan. 2024.

DANKAN GOWDA, V. et al. Smart agriculture and smart farming using IoT technology. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 2089, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1088/1742-6596/2089/1/012038. Acesso em: 15 ago. 2025.

ELHATTAB, K.; ABOUELMEHDI, K.; ELATAR, S. New Model to Monitor Plant Growth Remotely using ESP32 and Mobile Application. In: **International Conference on Advanced Communication Technologies and Networking (IEEE)**, out. 2023.

FILHO, J. C.; CUNHA, J. P. A. R. Agricultura de precisão: particularidades de sua adoção no sudoeste de Goiás – Brasil. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 4, 2015. Disponível em: https://doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v35n4p689-698/2015. Acesso em: 15 ago. 2025.

GETAHUN, S.; KEFALE, H.; GELAYE, Y. Application of precision agriculture technologies for sustainable crop production and environmental sustainability: a systematic review. **The Scientific World Journal**, v. 2024, 2126734, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2024/2126734. Acesso em: 15 ago. 2025.

GUILHOTO, J. J. M. The regional (state level) importance of the agribusiness GDP in the Brazilian economy. **SSRN Electronic Journal**, 2004. Disponível em: https://doi.org/10.2139/ssrn.2410375. Acesso em: 15 ago. 2025.

LI, J. et al. Biofortification of soybean grains with foliar application of Li sources. **Journal of Plant Nutrition**, v. 42, n. 19, p. 2521-2531, 2019.

MARDAMOOTOO, T. et al. Phosphorus management issues for crop production: a review. **African Journal of Agricultural Research**, v. 17, p. 939-952, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.5897/AJAR2020.15205. Acesso em: 15 ago. 2025.

MARTIN, R. C. **Clean architecture**: a craftsman's guide to software structure and design. 1. ed. Boston: Prentice Hall Press, 2017.

MELO, G. T. et al. Importância da agricultura de precisão para a eficiência da produção agrícola: uma revisão. **Contribuciones a las Ciencias Sociales**, v. 17, n. 5, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.55905/revconv.17n.5-102. Acesso em: 15 ago. 2025.

MENDES, R. A.; SOUZA, F. H. Arquiteturas de software resilientes para coleta de dados em zonas rurais intermitentes. **Journal of Agricultural Computation**, v. 12, n. 1, p. 45-58, 2024.

PLACIDI, P. et al. Monitoring soil and ambient parameters in the IoT precision agriculture scenario: an original modeling approach dedicated to low-cost soil water content sensors. **Sensors**, v. 21, n. 15, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.3390/s21155110. Acesso em: 15 ago. 2025.

PUTRI, R. E. et al. The design of automatic soil pH control system on Aloe vera cultivation with an integration of Internet of Things (IoT). **Jurnal Teknik Pertanian Lampung**, v. 12, n. 3, p. 597-609, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.23960/jtep-l.v12i3.597-609. Acesso em: 15 ago. 2025.

RIBEIRO, M. E. A. et al. Agricultura sustentável, irrigação e transformação digital. In: SIMPÓSIO MINEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 2023. **Anais [...]**. 2023. Disponível em: https://doi.org/10.22409/2675-4924.58447. Acesso em: 15 ago. 2025.

ROCHA, G. V. **Instrumentação eletrônica reativa aplicada ao manejo de solos agrícolas**. 2025. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2025.

SANTOS, L. M.; SILVA, T. R.; OLIVEIRA, J. F. Avaliação instrumental de sensores de solo de baixo custo para agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 27, n. 4, p. 280-288, 2023.

SILVA, G. M. C.; SILVA-MANN, R. Agricultura de precisão no Brasil: conjuntura atual, desafios e perspectivas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.33448/rsd-v9i11.9603. Acesso em: 15 ago. 2025.

SOUZA, C. O. et al. Impacto agrícola e da pecuária no estado do Pará. **Revista de Economia Regional Urbana e do Trabalho**, v. 7, n. 1, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.21680/2316-5235.2018v7n1id16711. Acesso em: 15 ago. 2025.

SULAEMAN, Y. et al. Developing and Testing a Portable Soil Nutrient Detector in Irrigated and Rainfed Paddy Soils. **Computers**, v. 13, n. 8, p. 209, ago. 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/2073-431X/13/8/209. Acesso em: 15 ago. 2025.

VILLAFUERTE, A. et al. Agricultura 4.0 - estudo de inovação disruptiva no agronegócio brasileiro. In: **Proceeding of ISTI/SIMTEC**, Aracaju, v. 9, n. 1, p. 150-162, 2018.

ZAMBERLAN, C. O.; CAVALCANTI, J. F. S. Agricultura familiar: sua relevância para o Brasil, o estado de Mato Grosso do Sul e o município de Ponta Porã. **Extensão Rural**, v. 26, n. 2, 2019. Disponível em: https://doi.org/10.5902/2318179634776. Acesso em: 15 ago. 2025.

ZHU, M.; SHANG, J.; CHEN, M. Remote monitoring and management system of intelligent agriculture under the Internet of Things and deep learning. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 2022, 1206677, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1155/2022/1206677. Acesso em: 15 ago. 2025.

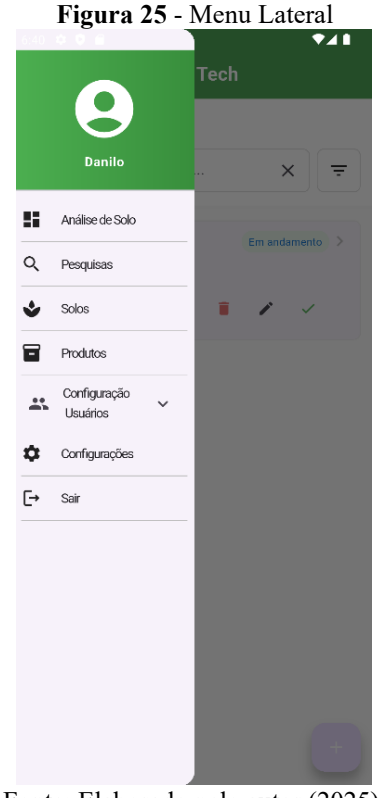
# APÊNDICE A – TELAS APLICATIVO MÓVEL

**Figura 24** - Tela de Autenticação



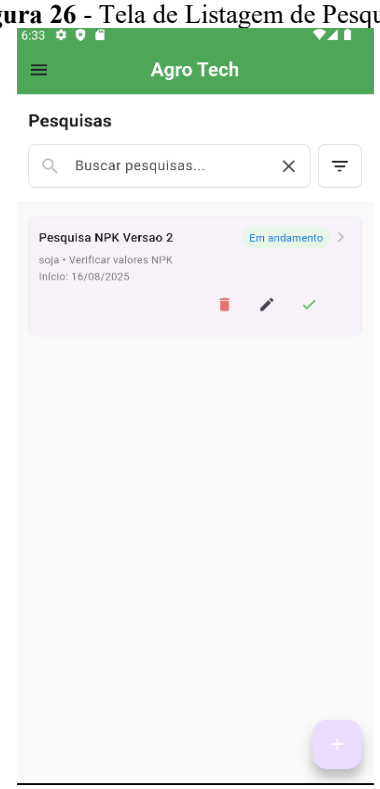

Fonte: Elaborado pelo Autor.

**Figura 25** - Menu Lateral



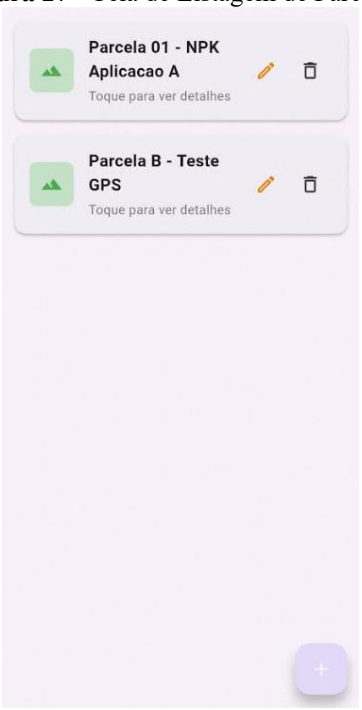

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 26** - Tela de Listagem de Pesquisas



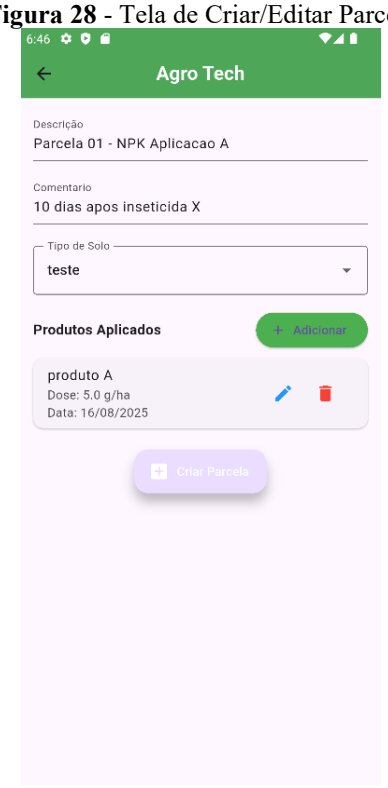

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 27** - Tela de Listagem de Parcelas




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 28** - Tela de Criar/Editar Parcela



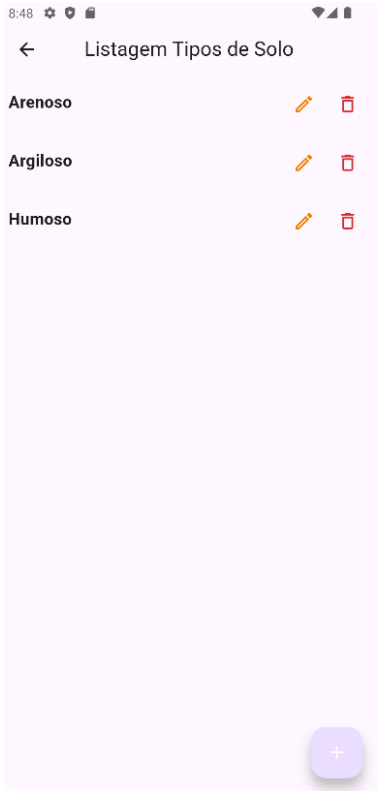

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 29** - Tela de Listar Leituras de Parcela



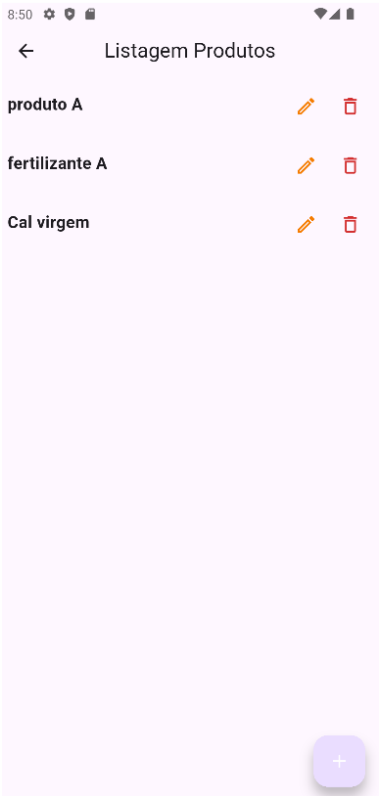

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 30** - Tela de Listagem Tipos de Solo



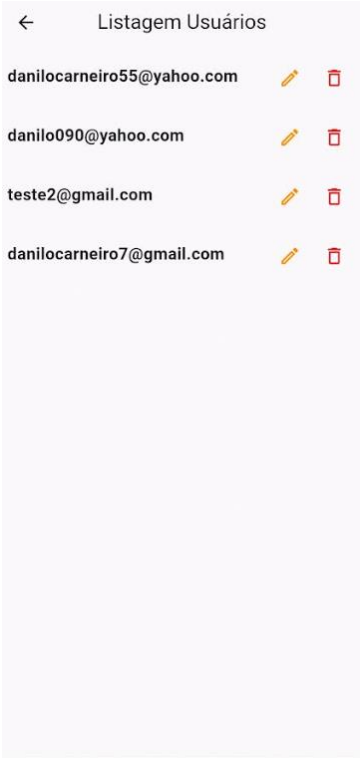

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 31** - Tela de Listar Produtos




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 32** - Tela de Listar Usuários "Aluno"



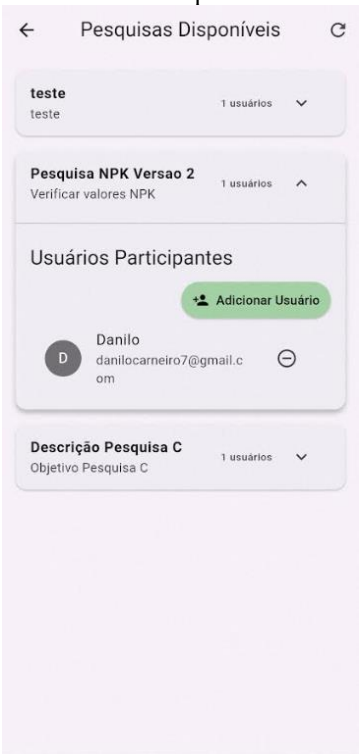

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 33** - Tela de Editar Usuário "Aluno"




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 34** - Tela de Exibir Pesquisas e Usuários Associados



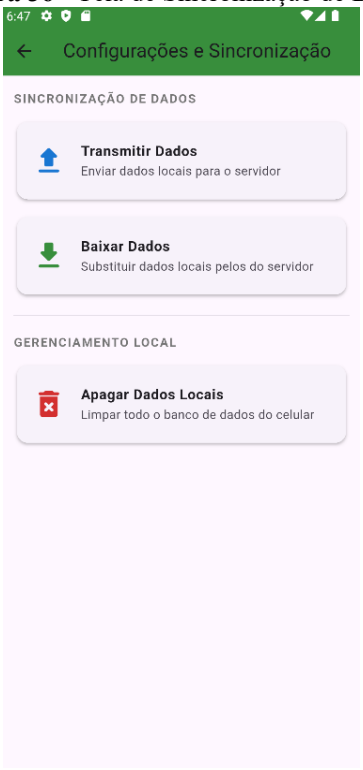

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

**Figura 35** - Modal para Vincular Usuário "Aluno"




Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

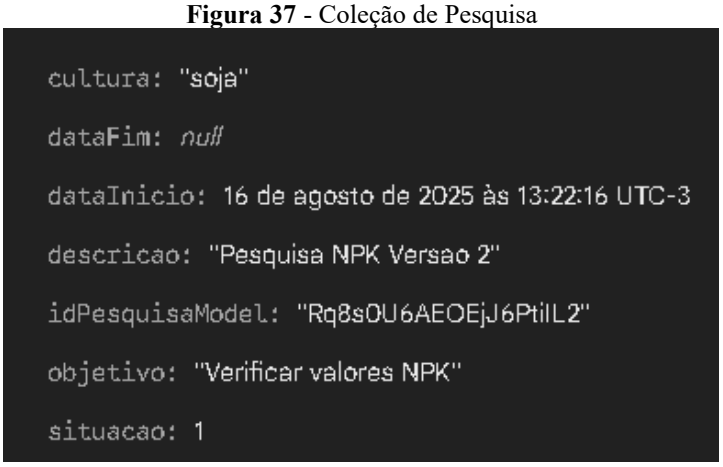
**Figura 36** - Tela de Sincronização de Dados




Fonte: Elaborado pelo autor.

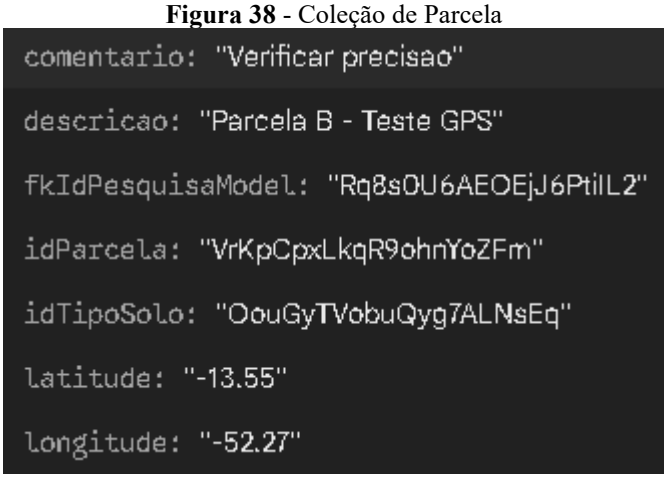
# APÊNDICE B – COLEÇÕES PRINCIPAIS NO BANCO DE DADOS FIRESTORE

**Figura 37** - Coleção de Pesquisa



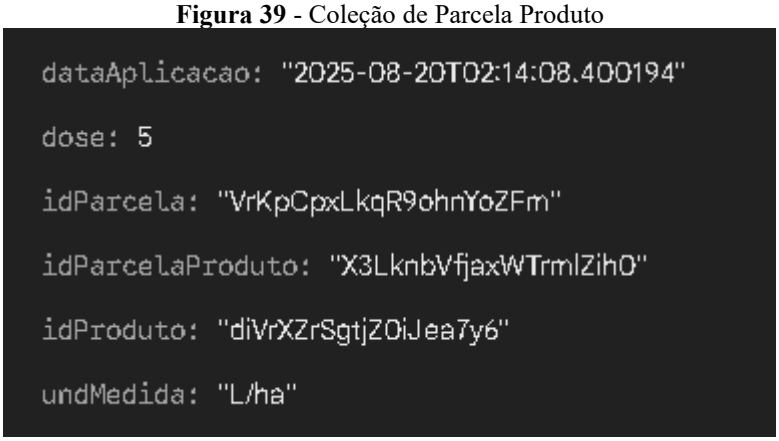

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 38** - Coleção de Parcela



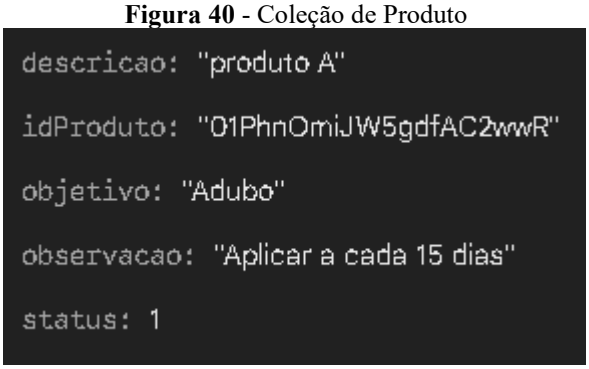

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 39** - Coleção de Parcela Produto



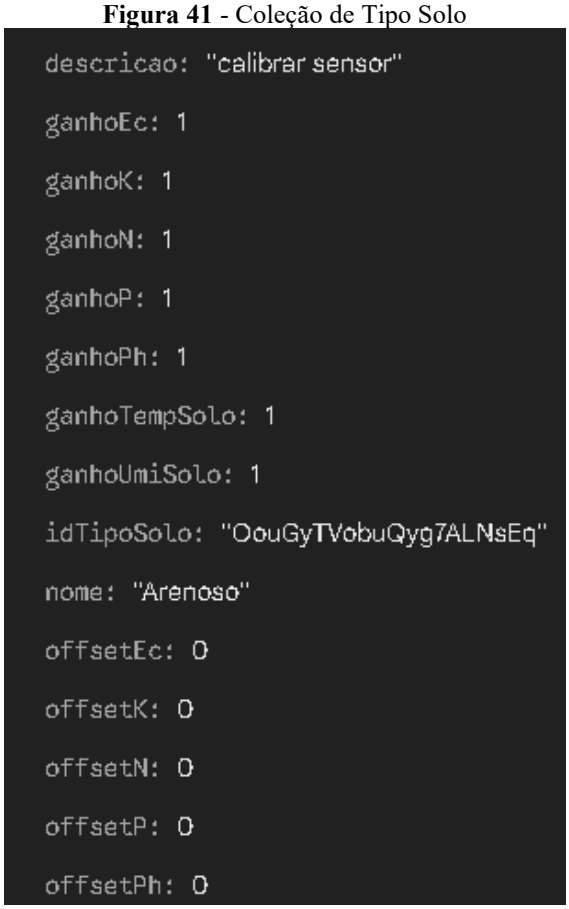

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 40** - Coleção de Produto



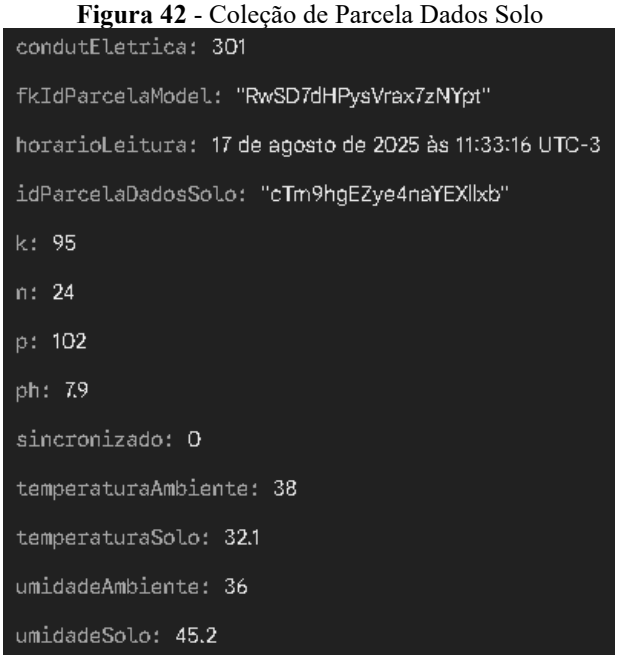

Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 41** - Coleção de Tipo Solo




Fonte: Elaborado pelo autor.

**Figura 42** - Coleção de Parcela Dados Solo

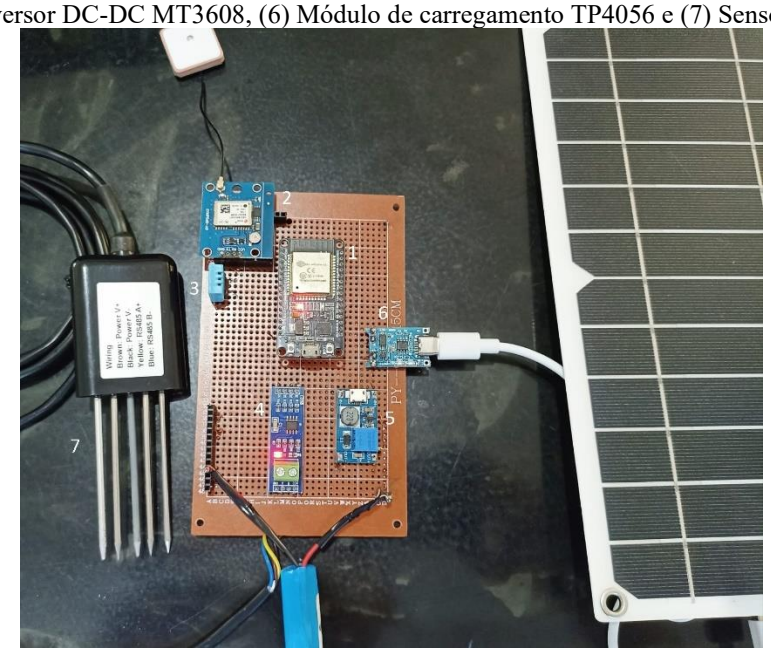



Fonte: Elaborado pelo autor.

# APÊNDICE C – REGISTROS FOTOGRÁFICOS DA MONTAGEM E ENCAPSULAMENTO DO PROTÓTIPO DE HARDWARE

As imagens a seguir documentam o resultado físico da engenharia de *hardware* descrita na Seção 4.2.2. A Figura 43 apresenta a vista superior do dispositivo finalizado, detalhando o *layout* e a disposição modular dos componentes sobre a placa de circuito perfurada (fenolite).

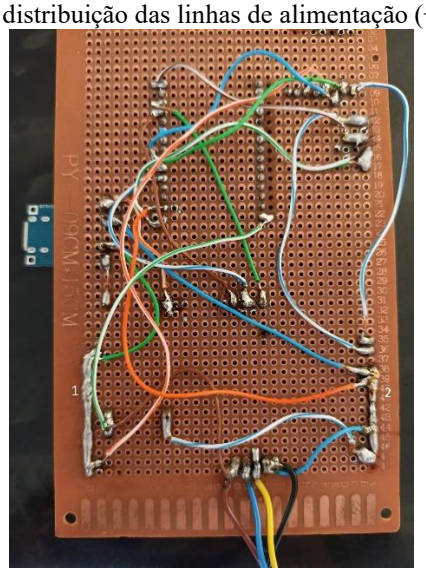
**Figura 43** - Vista superior do protótipo de hardware montado em placa perfurada (fenolite), exibindo o layout dos componentes principais: (1) ESP32, (2) Módulo GPS NEO-6M, (3) Sensor DHT11, (4) Conversor RS485, (5) Conversor DC-DC MT3608, (6) Módulo de carregamento TP4056 e (7) Sensor 7 em 1.




Fonte: Elaborado pelo autor.

A implementação física do circuito, apresentada na Figura 44, foi concebida com foco na durabilidade mecânica e no isolamento. A aplicação da técnica de barramento para distribuição das linhas de alimentação (+5V) e o ponto de aterramento comum (GND) garantem a estabilidade elétrica e a robustez do dispositivo contra vibrações em operações de campo.

**Figura 44** – Vista inferior da placa, detalhando as conexões soldadas. A imagem destaca a utilização da técnica de barramento para a distribuição das linhas de alimentação (+5V) e Terra (GND).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Visando a aplicação real em ambiente rural e a proteção contra intempéries (particulados e umidade extrema), todo o conjunto eletrônico de processamento e o subsistema de energia foram acondicionados em uma caixa hermética com grau de proteção IP67, conforme demonstrado na Figura 45. Esta abordagem de encapsulamento mecânico assegura a integridade do dispositivo para o monitoramento agrícola contínuo.

**Figura 45** - Protótipo Acondicionado na Caixa Hermética



Fonte: Elaborado pelo autor.