



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - CAMPUS PATOS DE MINAS
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

GABRIEL PARDUCCI MARTINELLI

SISTEMA INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE
FERTILIDADE DO SOLO EM TEMPO REAL

GABRIEL PARDUCCI MARTINELLI

SISMTEMA INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE FERTILIDADE DO SOLO EM TEMPO REAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito de avaliação da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini
Coorientador: Me. Daniel de Oliveira Ferreira

GABRIEL PARDUCCI MARTINELLI

SISTEMA INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE FERTILIDADE DO SOLO EM TEMPO REAL

Trabalho de conclusão de curso apresentado à banca examinadora como requisito de avaliação da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, *Campus* Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini
Coorientador: Me. Daniel de Oliveira Ferreira

Patos de Minas, 19 de março de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Pedro Luiz Lima Bertarini FEELT/UFU (Orientador)

M.Sc. Daniel de Oliveira Ferreira – FEELT/UFU (Coorientador)

Prof. Dr. André Antônio dos Anjos – FEELT/UFU (Banca Examinadora)

Prof. Dr. Guilherme Lopes de Figueiredo Brandão – FEELT/UFU (Banca Examinadora)

Dedico este trabalho a minha mãe, Valéria Martinelli, meus avôs Celso e Neuza e a meus tios Andreas, Carla, Celso e Sílvio. Chegar aqui foi graças a muita luta, entrega, persistência e dedicação. Tudo isso só foi possível graças a vocês.

Agradecimentos

Foram anos de muita luta, dedicação, noites em claro, ansiedade, provas e trabalhos, mas enfim, chegou o momento. O momento de finalizar um ciclo, o momento de refletir sobre toda essa história linda de aprendizados, bons momentos, histórias, risadas, choros, fofocas, treinos e jogos. O momento de agradecer por tudo que aconteceu pois, independente dos fracassos e sucessos que ocorreram no meio do processo, tudo isso me deixou mais forte, serviu de aprendizado e me moldou para que eu me tornasse o Gabriel de hoje, que escreve este texto.

Obrigado a toda minha família por sempre apoiar minhas loucuras, meus sonhos e me dar toda a confiança necessária para que eu pudesse voar alto pois sempre soube que, independentemente do que acontecesse, vocês estariam, estão e estarão sempre ao meu lado, incentivando, apoiando, aconselhando e me orientando, como sempre fizeram. Pois em momentos em que nem eu acreditava muito em mim e no processo, vocês estavam lá para me incentivar. E hoje, chegar nesse momento, de se tornar engenheiro eletrônico e de telecomunicações, é fruto de todo amor, carinho e dedicação que vocês tiveram por mim. Essa conquista foi por vocês.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos de Ribeirão Preto, Xande, Enzo, Colucci e Theus por sempre me apoiarem, me incentivarem e acreditarem em mim. Obrigado pela nossa amizade, apoio, rolês, risadas e zoeiras.

Agradeço também a todos os amigos de Patos de Minas que fiz nessa jornada. Ao Marcio, Mário, Arthur, Du, Fernando e Nathan (carioca), o meu muito obrigado por fazerem parte disso. Essa faculdade sem vocês não teria graça. Obrigado pelos rolês, pelos dias de futebol, zoeiras, ajuda nos momentos de dificuldade e incentivo. Agradeço ao Maycon, Cristhian, Natan, Lôredo, Amanda, Érica, Alfredo, Jheferson, Danielzinho, Leandro Bankai, Cláudio, Thays, Pedro, Luís e Paulo por todos os bons momentos que tivemos, por vocês me apoiarem nos momentos em que mais precisei e pelas boas risadas, conselhos, fofocas e rolês.

Gostaria de agradecer também o grupo de pesquisa Da Semente a Xícara pelo apoio em meu trabalho de conclusão de curso e, agradecer a todos os amigos que fiz nessa jornada: Marcelo, Parafino, Luiza, Marcela, Miltinho, Adriana, Elismar, Laila, Marília, Livia, Thomás, Líbia, Pedro, Matheus e Laurence.

Agradeço a todos os professores, servidores e colaboradores da UFU – Patos de Minas. Sem vocês, esse sonho não se tornaria realidade.

Por fim, agradeço ao Gabriel, por não ter desistido mesmo nas dificuldades, por ter sido resiliente, esforçado e por ter encontrado foco, força e fé para alcançar seus objetivos, porque, como dizem os Racionais, as oportunidades de mudança estão no presente. E o futuro será consequência do presente. Nunca deixe de sonhar e acreditar.

Resumo

Produzir em maior quantidade, em um menor espaço e sem degradar o meio ambiente vem sendo um desafio para os agricultores e pesquisadores. A utilização do solo sem o devido cuidado pode causar diversos problemas, sejam eles a erosão, infertilidade do solo e até intoxicação das bacias hidrográficas por meio do excesso de uso de fertilizantes. Neste contexto, aplicações de tecnologias relacionadas a Internet das Coisas (IoT) apresentam-se como candidatas para aumentar a eficiência. Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um sistema de monitoramento de solo em tempo real, capaz de monitorar a concentração de fósforo, potássio, temperatura, condutividade e umidade, utilizando um sensor NPK e um microcontrolador ESP32 com LoRa integrado. Como resultado, este trabalho apresenta um sistema que é capaz de coletar dados na fazenda, levá-los a um banco de dados e apresentá-los por meio de gráficos, mapas e tabelas, que podem ser acessados por um navegador de internet. Além disso, foi realizado um teste de cobertura LoRa preliminar. Uma análise detalhada do sensor utilizado também foi apresentada. Dessa maneira, espera-se que este trabalho contribua de maneira significativa, lançando as bases para um sistema de monitoramento de fertilidade do solo e, conseqüentemente, para a implantação da agricultura 4.0.

Palavras-chave: Internet das coisas. Agricultura. NPK. LoRa. Microcontrolador. ESP32. Agricultura 4.0.

Abstract

Producing in greater quantities, in less space, and without degrading the environment has been a challenge for farmers and researchers. The use of soil without proper care can cause various problems, such as erosion, soil infertility, and even the contamination of watersheds through the excessive use of fertilizers. In this context, applications of technologies related to the Internet of Things (IoT) emerge as candidates to increase efficiency. This study aimed to develop a real-time soil monitoring system capable of monitoring the concentrations of phosphorus, and potassium, as well as temperature, conductivity, and moisture, using an NPK sensor and an ESP32 microcontroller with integrated LoRa. As a result, this study presents a system capable of collecting data on the farm, transferring it to a database, and presenting it through charts, maps, and tables accessible via a web browser. Furthermore, a preliminary LoRa coverage test was conducted. A detailed analysis of the sensor used was also presented. Therefore, this work is expected to make a significant contribution by laying the groundwork for a soil fertility monitoring system and, consequently, for the implementation of Agriculture 4.0.

Keywords: Internet of things. Agriculture. NPK. LoRa. Microcontroller. ESP32. Agriculture 4.0.

Lista de figuras

Figura 1 – Aplicabilidade do IoT.	20
Figura 2 – Comparativo entre protocolos de comunicação utilizados no contexto de IoT com relação a taxa de dados e alcance.....	22
Figura 3 - Consumo de energia vs. alcance para protocolos de comunicação comuns.	23
Figura 4 – Símbolos LoRa visualizados em um espectrograma.....	27
Figura 5 – Estrutura do pacote LoRa.....	29
Figura 6 – Diagrama de blocos do trabalho.....	37
Figura 7 - Sensor NPK RS485 6 em 1.....	38
Figura 8 - Módulo Conversor RS485	39
Figura 9 – Prototipagem do circuito.....	40
Figura 10 – Interface gráfica do aplicativo.....	41
Figura 11 – Prototipagem do case.	42
Figura 12 – Diagrama das etapas para análise de amostras do solo.....	43
Figura 13 – Dispositivo transmissor durante realização dos experimentos.....	46
Figura 14 – Dispositivo receptor.	46
Figura 15 – Dashboard Web de monitoramento em tempo real.....	48
Figura 16 – Mapa de pontos de análise do solo.....	48
Figura 17 – Mapa com amostras coletadas à esquerda e linhas nível à direita.	49
Figura 18 – Mapa com círculos de distância.	50
Figura 19 – Resposta da concentração de fósforo para tempo de análise de 10 minutos.....	53
Figura 20 – Resposta da concentração de potássio para tempo de análise de 10 minutos.	53
Figura 21 – Resposta da concentração de fósforo para tempo de análise de 20 minutos.....	53
Figura 22 – Resposta da concentração de potássio para tempo de análise de 20 minutos.	54
Figura 23 – Resposta da concentração de fósforo para tempo de análise de 30 minutos.....	54
Figura 24 – Resposta da concentração de potássio para tempo de análise de 30 minutos.	54
Figura 25 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área P3.	57
Figura 26 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área P4.	57
Figura 27 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área A5.....	58
Figura 28 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área A7.....	58

Lista de tabelas

Tabela 1 - Comparação das tecnologias de conectividade para sistemas IoT.	21
Tabela 2 – Sensibilidade para LoRa com banda $BW = 125\text{ kHz}$, e coding rate 4/5.	28
Tabela 3 - Medição de parâmetros do solo.....	38
Tabela 4 - Especificações do sensor.....	38
Tabela 5 – Dados da análise da solução de estoque K_2HPO_4	51
Tabela 6 – Dados da análise da solução de estoque KCl	51
Tabela 7 – Parâmetros de R_2 e Inclinação em função do tempo de análise.....	55
Tabela 8 - Determinação de Umidade das amostras.....	56
Tabela 9 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área P3.....	59
Tabela 10 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área P4.....	59
Tabela 11 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área A5.	60
Tabela 12 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área A7.	60
Tabela 13 – Comparativo entre concentração de fósforo do laboratório x valor medido pelo sensor NPK.	61
Tabela 14 – Comparativo entre concentração de potássio do laboratório x valor medido pelo sensor NPK.	61
Tabela 15 – Dados da análise da solução aquosa de fósforo.....	77
Tabela 16 – Dados da análise da solução aquosa de potássio.	78

Lista de abreviaturas e siglas

ADP – *Adenosine Diphosphate* - Difosfato de Adenosina

ATP – *Adenosine Triphosphate* - Ácido Desoxirribonucleico

BLE – *Bluetooth Low Energy* - Bluetooth de Baixa Energia

BPSK – *Binary Phase Shift Keying* - Chaveamento de Deslocamento de Fase Binária

CSS – *Chirp Spread Spectrum Chirp* - Espectro de Espalhamento Chirp

DNA – *Deoxyribonucleic Acid* - Ácido Desoxirribonucleico

DSSS – *Direct-Sequence Spread Spectrum* - Espectro de Espalhamento de Sequência Direta

EUA – *United States of America* – Estados Unidos da América

FAO – *Food and Agriculture Organization* - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

FSK – *Frequency Shift Keying* - Chaveamento de Deslocamento de Frequência

GFSK – *Gaussian Frequency Shift Keying* - Chaveamento de Deslocamento de Frequência Gaussiana

IoT – *Internet of Things* - Internet das Coisas

ISM – *Industrial, Scientific, and medical* - Industrial, Científico e Médico

LCD – *Liquid Crystal Display* - Display de Cristal Líquido

LoRa – *Long Range* - Longo Alcance

LPWAN – *Low Power Wide Area Network* - Rede de Longa Distância e Baixo Consumo de Energia

LTE-M – *Long-Term Evolution Machine Type* - Evolução de Longo Prazo para Comunicação do Tipo Máquina

NB-IoT – *Narrowband IoT* - Internet das Coisas de Banda Estreita

pH – *Hydrogen Potential* - Potencial de Hidrogênio

QoS – *Quality of Service* - Qualidade de Serviço

QPSK – *Quadrature Phase Shift Keying* - Chaveamento de Deslocamento de Fase em Quadratura

RNA – *Ribonucleic Acid* - Ácido Ribonucleico

RTC – *Real Time Clock* - Relógio de Tempo Real

SF – *Spreading Factor* - Fator de Espalhamento

UNB – *Ultra NarrowBand* - Banda Ultra Estreita

Sumário

Sumário	12
1 Introdução.....	14
1.1 PROBLEMATIZAÇÃO	15
1.2 TEMA DO PROJETO	17
1.3 HIPÓTESE	17
1.4 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS	17
1.4.1 Objetivos gerais	17
1.4.2 Objetivos específicos.....	18
1.5 JUSTIFICATIVA	18
1.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	18
2 Fundamentação teórica.....	19
2.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1.1 Conceitos gerais IoT.....	19
2.1.2 Tecnologias de telecomunicações para IoT.....	20
2.1.3 LoRa.....	26
2.1.4 Agricultura 4.0.....	29
2.1.5 Fertilidade do solo	30
2.1.6 Sensor NPK	31
2.2 PESQUISAS CORRELATAS	32
2.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	36
3 Material e Métodos.....	37
3.1 SENSOR NPK	37
3.2 CONVERSOR RS-485.....	38
3.3 FIREBASE.....	39
3.4 MICROCONTROLADOR E COMUNICAÇÃO.....	39
3.5 EASYEDA.....	40
3.6 MIT APP INVENTOR	41
3.7 TINKERCAD	41
3.8 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO.....	42
3.8.1 Análise das amostras de solo	43
4 Resultados e discussões	45
4.1 PLATAFORMA E DISPOSITIVO IOT.....	45
4.1.1 Hardware.....	45
4.1.2 Interface móvel e georreferenciamento via BLE.....	47
4.1.3 Interface Web.....	47
4.2 AVALIAÇÃO DE TESTES LoRA	49
4.3 ANÁLISE DO SENSOR NPK E DAS AMOSTRAS DE SOLO	50
4.3.1 Determinação do tempo de análise do solo	52
4.3.2 Análise das amostras de solo	55

4.4	COMPARATIVO DE CUSTOS ENTRE O SISTEMA IOT X ANÁLISE LABORATORIAL	62
5	Conclusão e trabalhos futuros.....	63
5.1	CONCLUSÃO	63
5.2	TRABALHOS FUTUROS	64
	Referências	66
	ANEXO A: Tabelas dos experimentos realizados	77
	ANEXO B: Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial	79

1 Introdução

Desde o período neolítico (8000 a.c. até 5000 a.c.) a agricultura moldou tribos, aldeias e países, sendo fundamental para o desenvolvimento e crescimento da população mundial. A evolução da agricultura só se tornou possível graças ao desenvolvimento de técnicas e sistemas de cultivo voltadas para a ordem alimentícia (1), se intensificando na idade moderna, período marcado pelo início da agricultura capitalista (2).

Atualmente no Brasil o agronegócio se consolidou como um dos pilares da economia, sendo responsável por movimentar cerca de R\$ 2,58 trilhões de reais no ano de 2023, sendo R\$ 1,86 trilhão no ramo agrícola e R\$ 721 bilhões no ramo pecuário, equivalente a 23,8% do PIB brasileiro em 2023 (3). Para efeito de análise e comparação, entre os anos de 2002 e 2022, o PIB agrícola brasileiro aumentou de US\$ 122 bilhões para US\$ 500 bilhões de dólares. Em relação a área de plantio, em 20 anos, o país teve um aumento de 76,5%, saindo de 43,7 milhões em 2002 para 76,7 milhões de hectares em 2022 (4). Esses dados evidenciam o quanto o agronegócio ainda está em constante crescimento e desenvolvimento, contribuindo significativamente para a economia brasileira.

Porém, o crescimento desordenado do agronegócio, sem controle e fiscalização necessários, ocasiona diversos tipos de problemas ambientais. Nos Estados Unidos da América (EUA) por exemplo, o uso excessivo de fertilizantes e agrotóxicos são os causadores de uma grave poluição ambiental que vem afetando o rio Mississippi ao longo dos anos, e colocando a saúde pública em risco em vários estados dos EUA (5,6). O escoamento de fertilizantes que possuem como resultantes o nitrogênio, o fósforo e o potássio, quando em contato com a água, são conhecidos por criarem graves problemas à saúde nos seres humanos, podendo aumentar o risco de algumas doenças, como câncer, devido a altas ingestões de nitrato e fatores que aumentam a nitrosação endógena (6,7).

Ademais, a água poluída por contaminantes está ocasionando um desequilíbrio ambiental no ecossistema aquático da baía do golfo do México, onde os nitratos presentes na água reduzem a população de algas e, conseqüentemente, o nível de oxigênio do rio diminui drasticamente, afetando consideravelmente a vida marinha (5,6). Como resultado, a região do golfo do México onde as águas do rio Mississippi desaguam é conhecida como zona morta. Esta região atingiu cerca de 17365,87 quilômetros quadrados em 2024, sendo a 12º maior área registrada em 38 anos de medições (8).

Outro fator a se destacar é que a utilização de adubos químicos contribui com o agravamento das mudanças climáticas, visto que a utilização de fertilizantes quando em contato com o solo, libera óxido nitroso (9). Esse gás tem alto grau de impacto ao meio ambiente, sendo um dos que mais possui potencial de efeito estufa, mesmo em baixas quantidades emitidas para a atmosfera (10).

Neste cenário, tecnologias relacionadas a agricultura de precisão representam um importante artefato na busca por um agronegócio mais eficiente, tanto ambiental quanto economicamente, podendo, ao mesmo tempo, reduzir o custo do agricultor, e diminuir os problemas climáticos causados pelo uso de fertilizantes. Nesse sentido, esse trabalho aborda a criação de um dispositivo inteligente capaz de medir em tempo real as características químicas do solo, auxiliando o produtor rural na implementação de uma agricultura sustentável, e diminuindo assim, o uso excessivo de fertilizantes.

1.1 Problematização

A Internet das Coisas (IoT) tem sido uma revolução tecnológica de grande importância em nosso cotidiano. Sua importância se dá pela capacidade de conectar dispositivos físicos à internet, facilitando a comunicação entre dispositivos, viabilizando a extração de informações úteis, e consequentemente, a otimização de processos, utilizando sensores, atuadores e tecnologias de comunicação. Com o IoT, se tornou possível o monitoramento e controle remoto de dispositivos, aumentando a produtividade e otimizando processos (11,12).

Na agricultura, a IoT permitiu aos agricultores o monitoramento do campo de cultivo por meio de sensores, o uso de drones para mapeamento e aplicação de defensivos agrícolas e até mesmo o uso de sistemas automáticos de irrigação (13,14). Atualmente, é possível encontrar diversos aplicativos baseados em sensores que fornecem informações mais precisas e acrescentando uma maior precisão sobre a cultura, o solo e o clima, em relação aos métodos tradicionais, melhorando a qualidade dos produtos, processos e matérias-primas utilizados.

A IoT está sendo amplamente empregada no uso de drones agrícolas (14), que são dispositivos relativamente acessíveis, com sensores avançados, proporcionando aos agricultores uma maior praticidade no monitoramento da lavoura, aplicação de defensivos agrícolas, e muitas outras funções, aumentando significativamente a produtividade e reduzindo custos na produção. Além disso, as estufas inteligentes (15,16), que incluem sistemas hidropônicos e aquapônicos de pequena escala (17,18), estão se tornando cada vez mais comuns em áreas urbanas, pois são capazes de garantir o monitoramento de parâmetros essenciais ao

desenvolvimento das plantas, melhorando sua qualidade e crescimento (19). A agricultura vertical (20) também se beneficia das tecnologias de IoT, permitindo o controle da umidade do solo e do conteúdo de água através de computadores ou dispositivos móveis, como tablets e smartphones (21).

Porém, no Brasil, a inserção da agricultura 4.0 ainda enfrenta desafios. A escassez de recursos para o desenvolvimento de pesquisas, a dificuldade de acesso à internet em muitas regiões e a falta de assistência técnica prejudicam a difusão e implementação das novas tecnologias no meio rural (22). Com isso, muitos agricultores ainda dependem de métodos tradicionais, o que limita o potencial de aumento de produtividade e eficiência que as tecnologias de IoT podem proporcionar.

Ademais, a falta de infraestrutura adequada, como energia elétrica estável e redes de comunicação eficientes, também é um obstáculo significativo. Em muitas áreas rurais, a conectividade é limitada ou inexistente, dificultando o uso de dispositivos conectados e a coleta de dados em tempo real. A capacitação dos agricultores para o uso dessas novas tecnologias é outro desafio, pois muitos não possuem o conhecimento técnico necessário para operar e manter os sistemas de IoT.

Outro problema enfrentado é o alto custo inicial de implementação das tecnologias de IoT. Embora a longo prazo essas tecnologias possam reduzir custos e aumentar a produtividade, o investimento inicial pode ser considerado elevado para pequenos e médios agricultores. Além disso, apesar de existirem políticas públicas e incentivos governamentais para apoiar a adoção dessas tecnologias, esse apoio ainda não foi o suficiente para popularização da agricultura 4.0 no Brasil, uma vez que é necessário implementar, garantir manutenção e continuar evoluindo tais sistemas (23).

Por fim, questões relacionadas à segurança e privacidade dos dados coletados através de dispositivos IoT também são preocupações importantes. A proteção contra ciberataques e o uso ético dos dados são aspectos que precisam ser cuidadosamente considerados para garantir a confiança dos agricultores na adoção dessas tecnologias.

Apesar desses desafios, a agricultura 4.0 tem o potencial de transformar significativamente o setor agrícola no Brasil, promovendo uma produção mais sustentável e eficiente. Com investimentos adequados em infraestrutura, educação e políticas de incentivo, é possível superar essas barreiras, garantindo assim uma agricultura mais sustentável, ecológica e eficiente.

Diante desse cenário de disparidade tecnológica, este trabalho foca na implementação de um sistema de monitoramento de fertilidade de baixo custo, fundamentada na integração de

sensor NPK e na tecnologia de comunicação LoRa, como meio de viabilizar o fornecimento de dados em tempo real e auxiliar a redução das barreiras de infraestrutura e investimento que limitam a modernização no campo.

1.2 Tema do projeto

O tema deste projeto está relacionado ao estudo e implementação de tecnologias de Internet das Coisas voltadas para o monitoramento automatizado da fertilidade do solo no contexto da Agricultura 4.0. Dada a expressiva relevância econômica do agronegócio e a necessidade de mitigar impactos ambientais, como a contaminação de bacias hidrográficas pelo uso excessivo de fertilizantes, o emprego de soluções tecnológicas para elevar a eficiência das atividades de cultivo configura-se como um diferencial para a precisão produtiva e conservação dos recursos naturais. Nesse sentido, a pesquisa aborda a viabilidade técnica da integração de sistemas eletrônicos e redes de comunicação sem fio de longo alcance como meios para possibilitar um diagnóstico dinâmico das condições químicas do solo.

1.3 Hipótese

A hipótese deste trabalho é de que a construção e implementação deste sensor possa ser capaz de monitorar as concentrações de nitrogênio, fosforo e potássio presentes no solo de maneira precisa, facilitando a tomada de decisões com relação a fertilização do solo, diminuindo assim a utilização excessiva de fertilizantes nas plantações, além de diminuir tempo e custo do produtor com as análises de amostras de solo, aumentando a eficiência no campo e reduzindo problemas ambientais.

1.4 Objetivos gerais e específicos

1.4.1 Objetivos gerais

O principal objetivo deste projeto consiste no desenvolvimento de um dispositivo inteligente baseado em um microcontrolador, com o intuito de transmitir os dados do solo em tempo real, melhorando a eficiência na utilização de fertilizantes em plantações.

1.4.2 Objetivos específicos

- Revisar conceitos relacionados às tecnologias IoT e LoRa;
- Utilizar sensores eletrônicos para medir e monitorar as características químicas do solo;
- Implementar um sistema de comunicação LoRa, conectando as informações coletadas pelos sensores a uma plataforma em nuvem;
- Concepção e prototipagem de um dispositivo em Placa de Circuito Impresso (PCB);
- Criar um sistema de monitoramento em tempo real das informações coletadas do solo;
- Implementar uma solução que colete coordenadas geográficas e permita o mapeamento da cobertura LoRa e da distribuição de nutrientes no solo.

1.5 Justificativa

Considerando que a agricultura tem um papel econômico significativo, mas também gera um impacto ambiental, e que tecnologias de monitoramento representam uma oportunidade para aumentar a eficiência do setor, este trabalho representa uma importante contribuição, uma vez que pode analisar o aumento de produtividade em lavouras e contribuir com a diminuição de contaminação e utilização de recursos naturais.

1.6 Considerações finais

Neste capítulo, analisou-se a relevância histórica e atual do agronegócio no Brasil, destacando sua contribuição econômica e os desafios ambientais causados pelo uso de fertilizantes e agrotóxicos. Discutiu-se o potencial das tecnologias de agricultura de precisão e IoT para promover práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes, além de identificar obstáculos à implementação da agricultura 4.0 no país, como infraestrutura e capacitação técnica.

No próximo capítulo, será realizada uma revisão bibliográfica sobre conceitos gerais de IoT, tecnologias de comunicação e conceitos de agricultura 4.0, bases teóricas e obras recentes que abordam a temática a ser trabalhada.

2 Fundamentação teórica

Neste capítulo, para melhor entendimento deste trabalho, é necessária a familiarização do leitor com conceitos relacionados à agricultura 4.0 e IoT. Portanto, serão abordados aspectos como dispositivos eletrônicos, softwares e protocolos de comunicação que integram a infraestrutura tecnológica aplicada ao setor agrícola.

2.1 Revisão bibliográfica

2.1.1 Conceitos gerais IoT

Podemos definir o termo IoT como sendo uma rede de objetos físicos incorporados a sensores, softwares e outras tecnologias, com a finalidade de conectar e trocar informações com outros dispositivos e sistemas via internet, proporcionando automação de sistemas e processos, melhorando eficiência e criando possibilidades de interação. As tecnologias de IoT permitem que esses dispositivos colem e compartilhem dados, criando um ecossistema interconectado que pode ser aplicado em diversos setores, como a agricultura, saúde, indústria e cidades inteligentes (24,25,26).

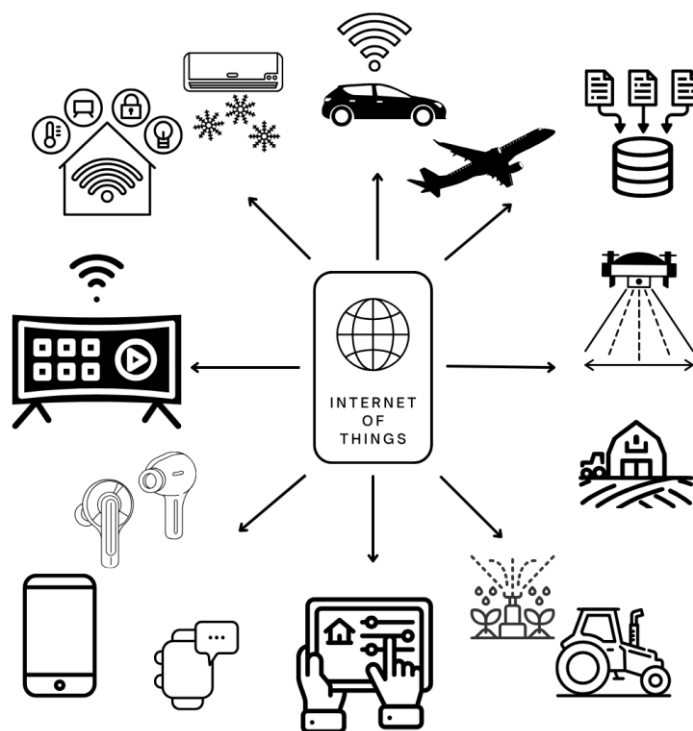
Atualmente, é possível ver o conceito IoT sendo aplicado em diversos dispositivos, como mostra a Figura 1, sejam eles eletrodomésticos simples ou até sistemas de monitoramento agrícola, garantindo maior confiabilidade na automação e otimização de processos. O funcionamento de uma rede integrada de dispositivos se dá pela combinação de hardware, software e conectividade (27). O hardware inclui os dispositivos físicos e sensores que colem dados do ambiente, como sensores de temperatura, umidade, movimento, entre outros. Esses dispositivos são equipados com microcontroladores e outros componentes eletrônicos que permitem a captura e transmissão de dados (26,27).

O software, por sua vez, é responsável pelo processamento e análise dos dados coletados. Ele inclui sistemas operacionais embarcados nos dispositivos, bem como plataformas de IoT que gerenciam a comunicação entre os dispositivos e os servidores. Essas plataformas utilizam algoritmos avançados para analisar os dados em tempo real, identificar padrões e gerar insights úteis para os usuários (24,27).

A conectividade é o elemento que permite a comunicação entre os dispositivos e os sistemas centrais. Isso pode ser feito através de diversas tecnologias de rede, como Wi-Fi, Bluetooth, redes celulares (3G, 4G, 5G), LoRa, entre outras. A escolha da tecnologia de

conectividade depende das necessidades específicas da aplicação, como alcance, consumo de energia e largura de banda (28).

Figura 1 – Aplicabilidade do IoT.



Fonte: o autor.

2.1.2 Tecnologias de telecomunicações para IoT

Existem diversas tecnologias de comunicação disponíveis para sistemas de IoT, que apresentam características e aplicações variadas. Dentre elas, destacam-se: ZigBee, WiFi, *Bluetooth Low Energy* (BLE), Z-Wave, LoRa, SigFox, *Long-Term Evolution Machine Type Communication* (LTE-M) e *Narrowband IoT* (NB-IoT) [28]. A Tabela 1 compara essas tecnologias, considerando aspectos importantes para a compreensão deste trabalho, como alcance, largura de banda, taxa de transmissão, entre outros parâmetros. Nesta tabela, são mostradas as tecnologias de curto e longo alcance, à esquerda e a direita, respectivamente.

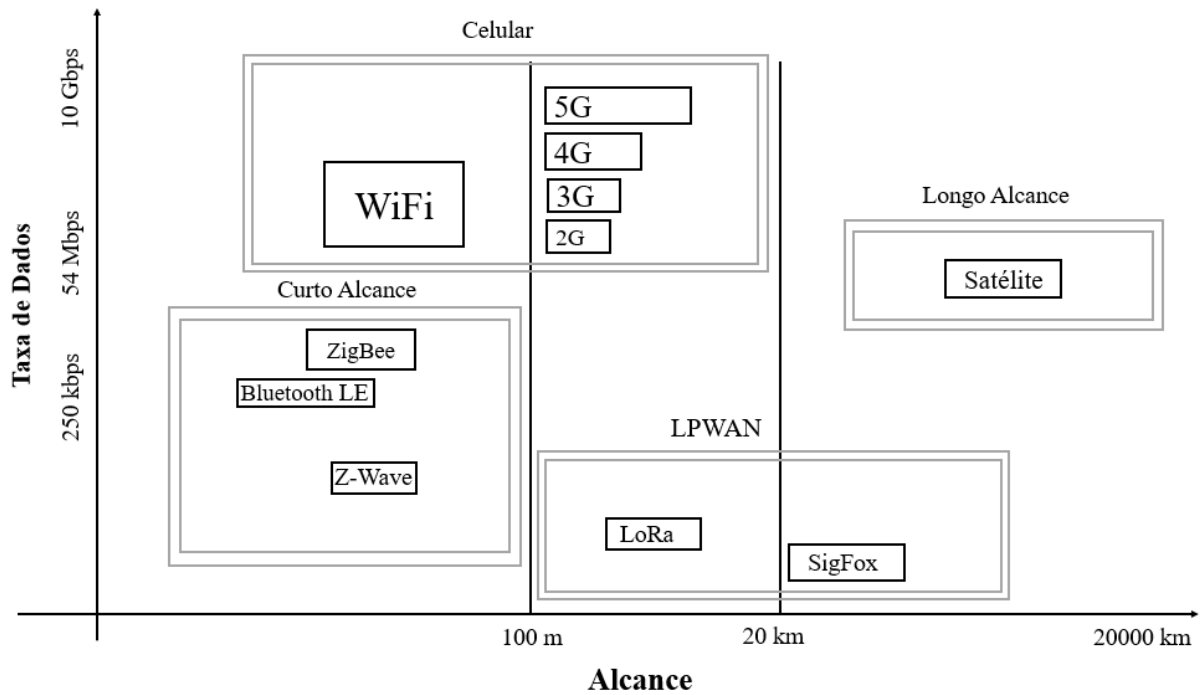
Tabela 1 - Comparação das tecnologias de conectividade para sistemas IoT.

Tecnologia	Tecnologia Wireless (curto alcance) (opera em faixa isenta de licença)				Tecnologias LPWAN (Longo Alcance)			
					Não Licenciado pelo 3GPP		Licenciado pelo 3GPP	
	ZigBee	WiFi	BLE	Z-Wave	LoRa	SigFox	LTE-M	NB-IoT
Alcance	75-100 metros	70-250 metros	Aprox. 100 metros	Aprox. 100 metros (por salto)	2-5 km (Cidade), 15 km (Campo)	3-10 km (cidade), 30-50 km (campo)	Aprox. 11km	10-15km
Largura de Banda	2 MHz	22 MHz	Faixa ISM de 2,4 GHz Cada canal possui 1 MHz	-	< 500 kHz (largura de banda do canal de 125kHz)	100 Hz	1,08 MHz (largura de banda portadora de 1,4MHz)	180 kHz (largura de banda portadora de 200kHz)
Faixa de frequência de operação	868 MHz, 915Mhz, 2.4 GHz	2.4 GHz / 5GHz	Faixa ISM de 2,4 GHz Cada canal possui 1 MHz	908.42 MHz (EUA) / 921,4 MHz (Brasil)	868MHz e 915MHz abaixo de 1GHz	faixa de 915-928 MHz abaixo de 1GHz	Faixa celular (2G,3G,4G e 5G)	700,800 e 900 MHz
Taxa de dados nominal (camada física)	250 kbps	600 Mbps	1 Mbps	40/100 kbps	Até 50 kbps	Aprox. 100 bps	375 kbps	250 kbps
Latência	Aprox. 15 ms	< 20 ms	< 10 ms	~1 s (wake up)	0,1 a 1 s	Alta (> 2 s)	10-15 ms	< 10 s
Custo	Baixo	Moderado	Menor custo	Baixo	Baixo	Baixo	Moderado	Moderado

Fonte: Adaptado (29).

A Figura 2 mostra um gráfico em que estas tecnologias são comparadas, considerando a distância de cobertura e a capacidade de transmissão de dados. Nela é possível observar agrupamentos de tecnologias e, dessa forma, analisar semelhanças e diferenças. Tecnologias como LoRa e SigFox possuem um alcance considerável, mas uma baixa taxa de dados e contrastam com as tecnologias de curto alcance próximas a origem do gráfico.

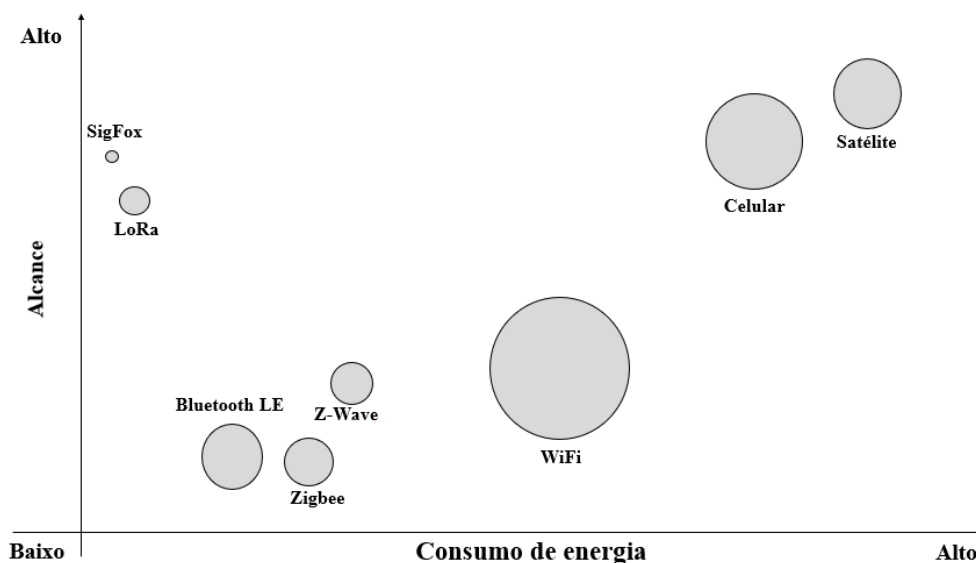
Figura 2 – Comparativo entre protocolos de comunicação utilizados no contexto de IoT com relação a taxa de dados e alcance.



Fonte: Adaptado (30).

Já a Figura 3 mostra um gráfico em que estas tecnologias são comparadas considerando a distância de cobertura e o consumo de energia. Nesta figura, o tamanho dos círculos representa a capacidade de transmissão de dados. É importante mencionar que não há proporcionalidade exata entre as grandezas representadas. No entanto, essas figuras fornecem uma visão importante a respeito de várias tecnologias de comunicação utilizadas em sistemas de IoT.

Figura 3 - Consumo de energia vs. alcance para protocolos de comunicação comuns.



Fonte: Adaptado (30).

Embora as tecnologias Wireless, ZigBee, WiFi, BLE e Z-Wave sejam redes sem fio de curto alcance, cada uma serve para diferente propósito. O WiFi tem como principal objetivo fornecer uma rede de alta velocidade taxa de dados (31). Além disso, o WiFi opera em diferentes padrões de rede sem fio, onde cada padrão corresponde a uma frequência específica em que o WiFi opera (32). Atualmente, o padrão mais comercializado é o IEEE 802.11b/g/n (31), que opera nas faixas de frequência de 2.4 GHz e 5 GHz. A faixa de 2.4 GHz garante um maior alcance com taxas de dados mais baixas, enquanto a faixa de 5 GHz oferece um menor alcance, mas com taxas de dados mais altas (33). Dentre as tecnologias de curto alcance e longo alcance, de acordo com a Tabela 1, o WiFi possui a maior taxa de transmissão, porém, com um consumo de energia superior as demais tecnologias e, com base na Figura 3, alcance relativamente maior quando comparado as tecnologias de curto alcance.

O BLE, um dos três principais padrões de protocolos Bluetooth, foi projetado para realizar comunicações sem fio de curto alcance que requerem baixa taxa de dados e restrição de energia (31). Operando na banda *Industrial, Scientific, and Medical* (ISM) de 2,4 GHz, o BLE utiliza salto de frequência adaptativo para contornar a interferência de outros dispositivos, mantendo robustez e eficiência na comunicação. Outro fator relevante é seu esquema de modulação. O BLE utiliza um esquema de modulação por chaveamento, chamada *Gaussian Frequency-Shift Keying* (GFSK) (34).

A comunicação entre os dispositivos Bluetooth se dá por uma configuração mestre-escravo, podendo ter até 7 dispositivos conectados a esta rede. Dessa maneira, o mestre pode

se conectar a estes dispositivos de maneira ponto a ponto ou multiponto (31). De acordo com a Tabela 1, o BLE possui um alcance de até 100 metros, e uma taxa de transmissão de 0,27 Mbps. Em relação a Figura 3, é possível notar que esta tecnologia possui um menor consumo de energia quando comparado a tecnologias de curto alcance e, um menor custo de implementação.

O ZigBee é um protocolo de baixa taxa de dados, projetado para aplicações de redes de monitoramento sem fio. Esta tecnologia utiliza protocolo IEEE 802.15.4, operando nos espectros de 868 MHz na Europa, 915 MHz nas Américas e 2.4 GHz mundialmente, sendo essa a mesma frequência de operação do WiFi (35). O ZigBee utiliza um protocolo de malha, permitindo que os dispositivos se comuniquem entre si. Isso torna a rede escalável e confiável (31,35). Seu funcionamento se dá através de um *hub* de automação, que atua como intermediário entre os dispositivos ZigBee e o roteador Wi-Fi, reduzindo o tráfego de dados que o roteador precisa processar. Com isso, a tecnologia sem fio ZigBee diminui a sobrecarga no roteador, já que apenas o *hub* se conecta diretamente a ele, enquanto todos os dispositivos se conectam ao hub. Isso torna a rede mais eficiente em comparação ao Wi-Fi, onde todos os dispositivos se conectam simultaneamente ao roteador (35). Em relação a modulação, o ZigBee utiliza *Direct-Sequence Spread Spectrum* (DSSS) como uma técnica de espalhamento que visa aumentar a potência do sinal e reduzir a influência do ruído de redes próximas (36).

O Z-Wave é outra tecnologia de baixa potência, usada em automações residenciais (37). Similar ao ZigBee, cada dispositivo pode atuar como um repetidor de sinal e se comunicarem entre si, oferecendo maior confiabilidade de rede. Além disso, essa tecnologia, ao contrário do ZigBee, não é afetada por interferências de Wi-Fi ou de outras tecnologias sem fio que operam a 2,4 GHz (31). Isso ocorre porque sua operação, conforme indicado na Tabela 1, ocorre na faixa de frequência de 908,42 MHz. A modulação utilizada nesta tecnologia é Chaveamento por Deslocamento de Frequência / Chaveamento por Deslocamento de Frequência Gaussiana (FSK/GFSK) (38). Por fim, o Z-Wave tem um alcance de 100 metros por salto (38) e consumo de energia maiores que o ZigBee e BLE, mas uma taxa de transmissão menor, de até 40 kbps como indicado na Tabela 1. Com base nessa tabela, e na Figura 2, o ZigBee apresenta uma taxa de transmissão maior que o Z-Wave, porém com um alcance relativamente menor.

Em relação às tecnologias *Low Power Wide Area Network* (LPWAN), destacam-se os protocolos LoRa, SigFox, NB-IoT e LTE-M. Esses sistemas foram projetados para aplicações de IoT que exigem longas distâncias de transmissão e baixo consumo de energia, cada qual com características distintas em termos de cobertura, eficiência e custo (29).

SigFox, principal concorrente do LoRa, é uma tecnologia de *Ultra NarrowBand* (UNB), de aproximadamente 100 Hz. Utilizando de forma eficiente a potência disponível, essa rede

assegura uma conexão confiável entre dispositivos a longas distâncias, mesmo na presença de interferência e ruído. Sua infraestrutura é semelhante à das redes de telefonia móvel, contando com torres, antenas, operadores e servidores de rede distribuídos globalmente, necessários para que as aplicações transmitam dados para a nuvem (39,40). Desse modo, ao transferir o processamento para a nuvem em vez de ser executado nos nós individuais, há uma redução no consumo de recursos (41). Os dispositivos que adotam SigFox usam uma modulação de banda lateral única com portadora totalmente suprimida, onde uma subportadora é modulada por uma modulação de dados *Binary Phase Shift Keying* (BPSK) (42).

Com base na Tabela 1, Figura 2 e Figura 3, podemos observar que, embora o SigFox ofereça um alcance maior, alta imunidade a ruídos e consuma menos energia em comparação com o LoRa, ele apresenta uma taxa de transmissão inferior. Outro ponto a ser considerado é que, apesar de o SigFox operar em faixa não licenciada, é necessário pagar taxas para utilizar a infraestrutura das antenas, e seu uso depende da área de cobertura disponível. Além disso, as taxas de upload e download são limitadas a 12 e 8 bytes, respectivamente (43,44).

Já o LoRa pode ser definido como uma camada física, um esquema de modulação (45) sem fio, derivada da tecnologia de *Chirp Spread Spectrum* (CSS) (46). Essa tecnologia, amplamente utilizada em comunicações militares e espaciais, garante imunidade ao multicaminho e a variações de intensidade ou amplitude que o sinal transmitido pode sofrer (47). Sua modulação conserva as características de baixo consumo de energia da FSK, ao mesmo tempo em que amplia significativamente o alcance da comunicação (29). A faixa de operação do LoRa se dá nas frequências de 868MHz na Europa e 915 MHz nas Américas (48).

Com base na Tabela 1, Figura 2 e Figura 3, a rede LoRa oferece um alcance de até 15 km em áreas rurais, possuindo um alcance menor e um maior consumo de energia quando comparado ao SigFox. Seu diferencial se dá na taxa de transmissão de aproximadamente 50 kbps contra 100 bps do SigFox, e pela arquitetura descentralizada, garantindo uma maior escalabilidade (47).

Por fim, tanto o NB-IoT quanto o LTE-M são tecnologias que utilizam bandas licenciáveis, ou seja, de uso restrito como visto na Tabela 1. O NB-IoT é um protocolo desenvolvido para simplificar certas funcionalidades do LTE, sendo uma escolha para dispositivos IoT que requerem baixo consumo de energia. A modulação utilizada é a *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK). Além disso, oferece uma taxa de transmissão de dados moderada, de aproximadamente 150 kbps (41), adequada para sensores e dispositivos que toleram um certo *delay* no envio e recepção de dados, visto que possui uma alta latência (41).

O LTE-M é uma variante do LTE, porém projetado para a transmissão de bits a uma taxa de dados mais elevada. Em comparação com o NB-IoT, o LTE-M foi desenvolvido para aplicações que necessitam de altas velocidades e menor latência, ocasionando um maior consumo de energia (41). Ele também opera em bandas de frequência licenciadas e suporta *handover*, permitindo que os dispositivos permaneçam conectados enquanto se movem entre diferentes áreas de cobertura. Com base na Tabela 1, O LTE-M oferece uma taxa de transmissão de dados mais alta em comparação com o NB-IoT, na faixa de 300/375 kbps e latência entre 10 a 15ms, enquanto o NB-IoT, de até 10 segundos.

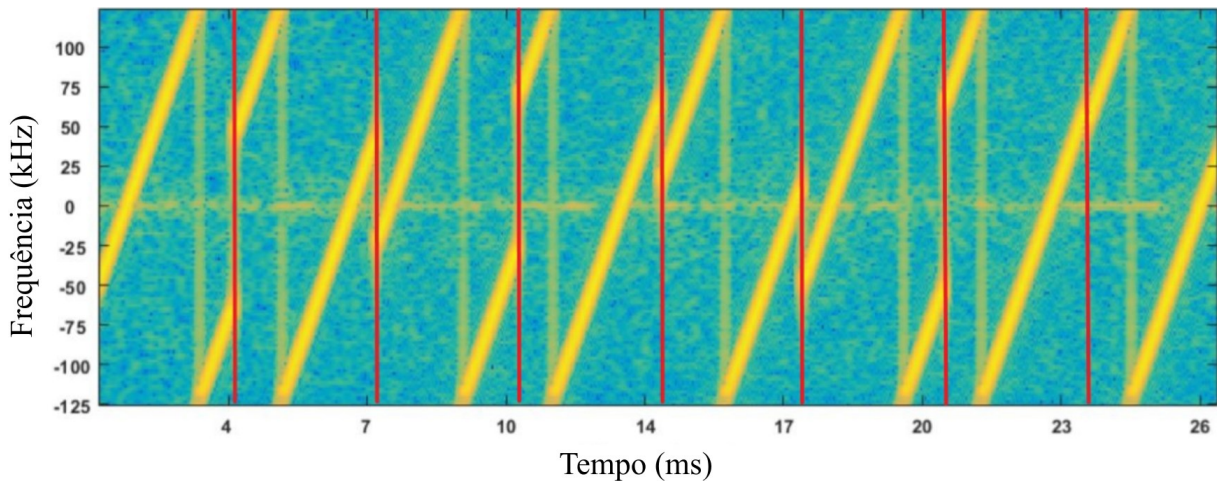
2.1.3 LoRa

Considerando os dados apresentados na seção anterior, é possível verificar que a tecnologia LoRa possibilita um alcance considerável e é uma opção viável para aplicações com baixo volume de dados e que precisam cobrir grandes áreas.

A camada física do LoRa é uma tecnologia proprietária e patenteada pela empresa Semtech Corporation, baseada na modulação CSS. Essa modulação utiliza formas de onda denominadas *chirps*, cuja frequência instantânea varia linearmente com o tempo ao longo de uma largura de banda predefinida. Cada símbolo é representado por um *chirp*, que se inicia com uma frequência (f_{offset}) distinta dos demais símbolos. Dada uma largura de banda (BW) de 125, 250 ou 500 kHz, a frequência de cada símbolo varia em torno da frequência da portadora (F_c), de $-\frac{BW}{2}$ a $\frac{BW}{2}$ (49,50,51).

Chirps cuja frequência aumenta com o tempo são chamados de *upchirps* enquanto os que diminuem sua frequência com o tempo são chamados de *downchirps*. A Figura 4 mostra alguns símbolos *upchirps*. Nesta figura pode-se observar que a frequência de um símbolo varia de f_{offset} até $\frac{BW}{2}$ e, se necessário, retorna a $-\frac{BW}{2}$ variando linearmente de forma cíclica ao longo do tempo de símbolo (49,50).

Figura 4 – Símbolos LoRa visualizados em um espectrograma.



Fonte: Adaptado (50).

Um parâmetro importante do LoRa é o *spreading fator* (SF), que está relacionado ao tempo de um símbolo (T_s) dado pela equação

$$T_s = \frac{2^{SF}}{BW}, \quad (1)$$

Dessa maneira, cada chirp LoRa é composto por $N = 2^{SF}$ chips (49).

A taxa de transmissão de chips é determinada pela largura de banda. Fisicamente, a duração de um único chip é definida por $T_{chip} = \frac{1}{BW}$ (52). Dessa forma, se o fator de SF for mantido e a largura de banda reduzida, cada chip levará mais tempo para ser transmitido. Isso ocorre, pois, a taxa na qual os chips são transmitidos, chips por segundo, é igual à própria largura de banda BW (49). Consequentemente, a redução da largura de banda implica no aumento da duração do símbolo do sinal. Como o número de chips por símbolo é fixo para um mesmo SF, essa redução faz com que a duração total do símbolo aumente, elevando diretamente o tempo de transmissão, *time-on-air* (ToA) (52).

Por outro lado, se aumentado o SF e mantida a largura de banda fixa, o tempo de símbolo também aumentará. Na modulação LoRa, uma maior duração do símbolo permite ao receptor acumular a energia do sinal por um período mais extenso. Esse processo facilita a distinção entre o sinal útil e o ruído de fundo, resultando em uma melhora significativa da sensibilidade do receptor (49). Na literatura, a utilização de um SF 12, que possui T_s maior, por exemplo, permitiu que o sistema opere com uma relação sinal-ruído (SNR) de aproximadamente -20 dB, enquanto o SF 7 requer cerca de -6 dB, conforme Tabela 2 (52).

Tabela 2 – Sensibilidade para LoRa com banda $BW = 125 \text{ kHz}$, e coding rate 4/5.

SF	$P_{Rx} \text{ (dBm)}$	$SNR \text{ (dB)}$
7	-123	-6
8	-126	-9
9	-129	-12
10	-132	-15
11	-134,5	-17,5
12	-137	-20

Fonte: Adaptado (52).

Ao se aumentar a largura de banda, reduz-se a duração do chip e, conseqüentemente, diminui-se a duração do símbolo. Embora isso reduza o tempo de ocupação do canal, o receptor dispõe de menos tempo para integrar a energia do sinal, o que acarreta uma redução na sensibilidade e no alcance efetivo do enlace. Além disso, uma largura de banda maior permite a entrada de uma maior quantidade de ruído térmico no receptor (52).

Portanto, a configuração desses parâmetros deve ser ajustada conforme os requisitos específicos de cada projeto. Aplicações que demandam longo alcance ou que operam em ambientes hostis devem priorizar a robustez, maior SF e menor BW, aceitando taxas de transmissão menores. Em contrapartida, cenários onde o consumo energético e a velocidade são críticos podem se beneficiar de uma menor duração de símbolo, isto é, menor SF e maior BW, desde que a transmissão ocorra com SNR suficiente (52).

Um dos parâmetros importantes ao utilizar o LoRa é o coding rate (CR), que define a quantidade de redundância inserida na mensagem. Os valores de 4/5, 4/6, 4/7 e 4/8 definem variações de códigos de *Hamming* cíclicos utilizadas. Enquanto taxas de redundâncias mais altas como 4/8 permitem a correção de erros de bit e a detecção de erros duplos, taxas menores como 4/5 oferecem apenas detecção de paridade, priorizando a eficiência espectral e o menor tempo de transmissão em detrimento da confiabilidade (50,53).

A taxa de bits de uma transmissão LoRa pode ser calculada pela expressão a seguir (54):

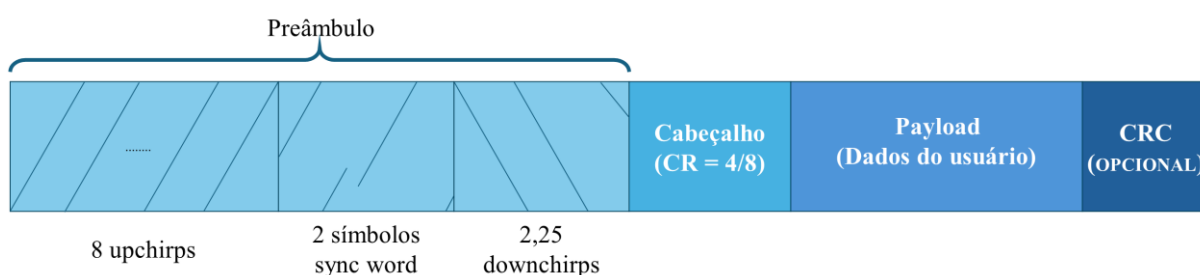
$$R_b = SF \cdot \frac{BW}{2^{SF}} \cdot CR. \quad (2)$$

Dessa maneira, é necessário compreender que os parâmetros SF, BW e CR podem tornar a transmissão mais robusta, mas reduzir a taxa de dados.

A estrutura do pacote LoRa é dividida em três seções, como mostrado na Figura 5. O pacote tem início com o preâmbulo, que é composto por: uma sequência de *upchirps* não modulados, que por padrão são oito símbolos, utilizados para detecção de atividade; seguidos

por dois símbolos de identificação de rede, *sync word*; e finalizado por uma sequência de 2,25 *downchirps*, cuja inversão de inclinação é crítica para que o receptor realize a sincronização fina de tempo e frequência (49,50,55). Em seguida, temos o cabeçalho, que no modo explícito informa ao receptor os parâmetros da transmissão atual, isto é, o comprimento da mensagem, a CR e a presença de CRC, que consiste em um código de detecção de erros baseado em redundância cíclica, utilizado para verificar a integridade dos dados e assegurar que o pacote recebido não sofreu alterações durante o enlace de comunicação. Esta seção sempre é codificada com a maior redundância disponível, CR 4/8, para assegurar que essas informações sejam decodificadas mesmo em condições adversas. Por fim, transmite-se o *payload* que contém os dados, e que pode ser encerrado opcionalmente por um CRC de 16 bits para verificação de integridade dos dados (50,55).

Figura 5 – Estrutura do pacote LoRa.



Fonte: Adaptado (50).

2.1.4 Agricultura 4.0

A agricultura 4.0 é um conceito que se refere à aplicação de tecnologias avançadas no setor agrícola, visando otimizar a produção e a gestão das fazendas por meio da utilização de sensores e sistemas de automação. Esse termo surgiu como uma extensão da Indústria 4.0, que integra tecnologias digitais para melhorar processos industriais. Na agricultura, isso se traduz na utilização de ferramentas como inteligência artificial, *big data*, sensores IoT e sistemas de gestão para coletar, processar e analisar dados agrônômicos em tempo real, permitindo o monitoramento das condições do solo, clima e saúde das plantas, proporcionando dados precisos que auxiliam na tomada de decisões mais assertivas e eficientes (56,11,57).

2.1.5 Fertilidade do solo

O solo é uma estrutura heterogênea, composta por minerais, água, ar, fungos, bactérias, e demais organismos (58), sendo de grande importância para o desenvolvimento humano e econômico. Segundo a *Food and Agriculture Organization* (FAO), fertilidade do solo pode ser definida como a capacidade do solo de sustentar o desenvolvimento das plantas, para o crescimento delas (59). Os nutrientes podem ser divididos em elementos essenciais e elementos benéficos (60), sendo 16 considerados importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas (61).

Os elementos essenciais, como Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), que são macronutrientes, estão diretamente ligados ao metabolismo das plantas. Sem esses nutrientes, as plantas podem não completar seu ciclo de vida, apresentando sintomas de deficiência de nutrientes. Vale ressaltar que, para a utilização eficiente dos nutrientes presentes no solo, as plantas também necessitam de água, luz e temperatura de maneira adequada (61).

O nitrogênio, disponível para as plantas na forma de íons amônio (NH_4^+) e nitrato (NO_3^-), é utilizado na formação de aminoácidos, importantes para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Este elemento participa das reações enzimáticas e da fotossíntese como parte da molécula de clorofila, melhorando a quantidade de matéria seca em vegetais folhosos e proteínas em culturas de grãos. A falta de nitrogênio diminui a divisão celular, causando crescimento atrofiado. Em casos graves, ocorre redução da floração, do teor de proteínas e queda na produtividade e qualidade da colheita (61).

O fósforo, disponível para as plantas na forma de íons ortofosfato (HPO_4^{2-} , $H_2PO_4^-$) atua no armazenamento e transferência de energia (ATP e ADP) e na estrutura do DNA e RNA. O elemento se concentra em células jovens, como brotos e raízes, auxiliando no desenvolvimento radicular e na formação de sementes e frutos. A falta de fósforo reduz a velocidade da divisão celular, resultando em crescimento lento e atrofiado. Em casos graves, as folhas mais velhas apresentam coloração escura ou roxa, com atraso na maturidade e má formação de frutos (61).

Por fim, o potássio, disponível para as plantas na forma de íons K^+ , atua como ativador de enzimas e regulador do uso de água através da abertura e fechamento dos estômatos. O elemento auxilia na produção de ATP e no transporte de açúcares para o crescimento e armazenamento em frutos e raízes, melhorando o tamanho dos grãos e a resistência a doenças. Plantas deficientes em potássio terão redução do crescimento vegetativo, e em algumas culturas,

os caules podem ser fracos, com maior ocorrência de acamamento. O tamanho e a quantidade de sementes e frutos também são reduzidos (61).

2.1.6 Sensor NPK

A avaliação dos macronutrientes nitrogênio, fósforo e potássio no solo representa um obstáculo técnico significativo na agricultura moderna, visto que os métodos laboratoriais tradicionais são demorados, impraticáveis para aplicações em larga escala e exigem tratamentos químicos complexos, resultando em altos custos e latência na obtenção dos resultados (62). Para contornar essas limitações, a comunidade científica tem desenvolvido diferentes tecnologias de sensores capazes de quantificar os nutrientes diretamente no campo e em tempo real, sendo categorizadas principalmente em sensores ópticos, eletroquímicos e baseados em condutividade elétrica (62,63).

Os sensores ópticos e espectroscópicos operam a partir da interação da radiação luminosa com os constituintes do solo, baseando sua medição em propriedades como absorção, reflexão, emissão, fluorescência e luminescência (63). Ferramentas analíticas de alta precisão, como a espectroscopia de emissão óptica por plasma acoplado indutivamente, aquecem a amostra para produzir radiação eletromagnética que é separada em comprimentos de onda específicos e medida por detectores altamente sensíveis (64).

Para o uso direto no campo, tecnologias como a espectroscopia de refletância no infravermelho e os sensores colorimétricos portáteis empregam diodos emissores de luz e fotodiodos que quantificam os nutrientes a partir de mudanças na absorção luminosa com base nas características de cada elemento. Esses sistemas permitem análises rápidas e não destrutivas de múltiplos elementos, porém, exigem calibrações matemáticas extensas, sendo que os testes colorimétricos frequentemente demandam preparo prévio e o uso de reagentes químicos para funcionar adequadamente (62).

Por sua vez, os sensores químicos, com notória aplicabilidade para a classe dos eletroquímicos, transformam a interação com a substância alvo em um sinal analítico útil através de técnicas potenciométricas, voltamétricas ou condutimétricas (63). A tecnologia mais utilizada nesta categoria abrange os eletrodos seletivos a íons e os transistores de efeito de campo sensíveis a íons, compostos por membranas poliméricas que contêm matrizes de alto peso molecular, plastificantes e trocadores iônicos projetados para capturar um nutriente específico. O mecanismo de detecção ocorre quando o íon interage com a membrana do

eletrodo de trabalho, gerando uma diferença de potencial elétrico mensurável em relação a um eletrodo de referência (62).

Embora esses dispositivos possibilitem a quantificação direta em tempo real e possuam alta sensibilidade na detecção de nutrientes inorgânicos como nitrato e potássio, a aplicação prática no solo enfrenta obstáculos operacionais. Eles sofrem com a interferência cruzada de outros íons presentes no meio, apresentam desgaste físico rápido das membranas e são vulneráveis à deriva de sinal, fatores que impõem a necessidade de recalibrações constantes para manter a acurácia das leituras ao longo do tempo (62).

Por fim, a avaliação de macronutrientes por meio da condutividade elétrica aparente constitui uma técnica rápida e de baixo custo para a estimativa dos níveis de nitrogênio, fósforo e potássio no solo. O método baseia-se na inserção de eletrodos metálicos, geralmente compostos de aço, prata ou platina, diretamente na amostra de solo, seguida pela aplicação de uma tensão de corrente alternada. As alterações na corrente elétrica, impulsionadas pela movimentação dos íons no meio, são detectadas e convertidas em concentrações estimadas de nutrientes (62).

A principal vantagem dessa abordagem reside na sua velocidade de resposta e viabilidade econômica para a realização de testes em larga escala. Contudo, a acurácia deste método pode ser comprometida por diversos fatores de confusão, visto que a medição da condutividade global não possui seletividade iônica e é fortemente influenciada por variáveis como o pH e o teor de matéria orgânica do solo (62). Observa-se também uma forte divergência quando as leituras são comparadas com análises químicas convencionais, cenário no qual os sensores eletrônicos apresentam um alto desvio padrão e baixa correlação com os resultados de laboratório. Essa diferença ocorre porque as tecnologias eletrônicas e os laboratórios utilizam metodologias totalmente distintas, em que o sensor detecta os nutrientes retidos na matriz do solo que conduzem eletricidade, enquanto as análises químicas quantificam os nutrientes disponíveis (62,64).

2.2 Pesquisas correlatas

As aplicações de IoT na agricultura presentes na literatura são variadas. Por exemplo, o trabalho de Jian Yang et al. (65) descreveu a criação de um sistema IoT agrícola capaz de coletar dados do solo em tempo real, utilizando a tecnologia LoRa para transmissão de informações. Este trabalho teve como foco o desenvolvimento de um modelo capaz de prever variações de temperatura, com um método capaz de lidar com dados ausentes e anômalos.

Madhumathi R et al, (66) desenvolveu um sistema que monitora os níveis de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), potencial hidrogeniônico (pH) e temperatura do solo. Os dados são transmitidos para uma nuvem e exibidos em um aplicativo, que também recomenda a quantidade ideal de fertilizantes para diferentes culturas. Este projeto utiliza sensores como o FC28 para umidade do solo, DS18B20 para temperatura e um sensor NPK não definido. Contudo, a precisão do projeto não foi apresentada.

Wahyu Pamungkas et al. (64) compara a precisão de duas técnicas para avaliar a fertilidade do solo usando sensores eletrônicos e resultados de testes laboratoriais. O foco está na precisão dos sensores eletrônicos em comparação com medições laboratoriais, explorando também o planejamento da rede de comunicação LoRa e o design de sensores eletrônicos. O desvio padrão do sensor em relação aos testes laboratoriais foi extremamente alto. Utiliza sensores como NPK.

Stefan Postolac et al. (60) desenvolve sistemas baseados em IoT para avaliar os nutrientes do solo na horticultura. Além disso, são apresentadas técnicas e tecnologias para a avaliação da fertilidade do solo. Este projeto utiliza um painel solar para alimentar uma bateria de 5V e transmite dados via Wi-Fi, embora não especifique todos os sensores utilizados além do DHT22. Entre os sensores mencionados estão NPK, pH e condutividade elétrica.

N.N.C Othaman et al. (67) desenvolve um dispositivo de detecção com um microcontrolador e sensores conectados para testes no local, explorando a relação entre a condutividade elétrica e a salinidade do solo. Embora o projeto mostre o diagrama de comunicação LoRa, não evidencia testes laboratoriais. Utiliza sensores como GPS, NPK, DS18B20 e EC K 10.

Doan Perdana et al. (68) busca usar a IoT no setor agrícola, especialmente no cultivo de soja, para monitorar automaticamente o estado do solo e aplicar fertilizantes, visando melhorar a qualidade e quantidade da soja. O foco principal é a transmissão de dados, utilizando LoRaWan e sensores como NPK, além de uma bomba d'água, um relógio em tempo real (RTC) e painel solar.

D. Perdana et al. (69) desenvolveram um sistema para medir nutrientes usando a rede LoRaWan, melhorando trabalhos anteriores e detalhando toda a construção do projeto. O artigo analisa a utilização de um *gateway* público e um privado, comparando perda de pacotes e SNR. Os autores alcançaram 90% de precisão em relação às medidas NPK analógicas. O projeto utilizou um display de cristal líquido (LCD), sensores DHT 11, de umidade e temperatura, YL-38, de umidade de solo, e um sensor NPK não especificado, microcontrolador ESP 32 LR 201 e módulo LoRa RFM95.

Doan Perdana et al. (70) realizaram uma pesquisa incluindo o projeto do sistema, diagramas de blocos, projeto lógico do sistema de portas inteligentes, design de aplicativos, ferramentas e materiais utilizados, bem como *software* de suporte. Foram realizados testes de qualidade de serviço e análise de desempenho, com foco na transmissão de dados. A pesquisa utilizou sensores NPK e YL-69, LCD, IC LM 741, Power Bank e IC 4051, estabelecendo comunicação via Wi-Fi, com o módulo ESP 8266 12.

Laura García et al. (71) compararam os efeitos das transmissões Wi-Fi e LoRa na vida útil da bateria, pois, segundo os autores, nenhuma comparação anterior entre o consumo de energia do Wi-Fi e do LoRa em dispositivos IoT havia sido realizada. O artigo sugere que as configurações do LoRa precisam ser ajustadas para obter eficiência energética ideal, como reduzir os valores de potência de transmissão, diminuir o fator de dispersão (SF) e aumentar a largura de banda. Utilizaram o dispositivo Heltec Wi-Fi LoRa 32 com interface de bateria SH1.25-2 integrada.

Benlahsiniya Maroua et al. (72) analisaram diversas arquiteturas inteligentes na agricultura, destacando os pontos fortes e fracos de cada uma. O artigo compara 11 arquiteturas diferentes, apresentando apenas um resumo de cada trabalho, sem detalhes de implementação. As tecnologias comparadas incluem 5G-MEC, LoRa, WSN, Wi-Fi, 3GPP, nRF, AVR e LoRaWAN.

Sandeep Bhatia et al. (73) desenvolveram um protótipo de IoT-WSN energeticamente eficiente, utilizando principalmente o protocolo de tecnologia sem fio LoRaWAN e comparando diferentes tipos de comunicação. O artigo apresenta diversos dados comprovando a eficácia e mostrando os pontos fortes e fracos da comunicação utilizada. Utilizaram sensores DHT22, LM393 e módulo LoRaWAN com Arduino Nano e LoRa E32.

Rashmi Sharan Sinha, et al. (74) compararam LoRa e NB-IoT em termos de características físicas, arquitetura de rede e protocolo MAC. O artigo também abordou fatores relacionados à IoT, como qualidade de serviço (QoS), vida útil da bateria, latência, cobertura de rede, alcance, modelo de implantação e custo. Concluíram que LoRa se concentra em aplicações de baixo custo, enquanto NB-IoT é direcionado a aplicações que exigem alta QoS e baixa latência.

Raquel Gómez-Chabla et al. (21) realizaram uma revisão sistemática da literatura com o objetivo de identificar as principais aplicações de IoT na agricultura, os dispositivos e softwares baseados em IoT utilizados, bem como os benefícios proporcionados por essa tecnologia. O estudo incluiu 60 trabalhos, mencionando LoRa em um deles.

Abhishek Khanna e Sanmeet Kaur (75) apresentaram uma revisão abrangente da literatura sobre o conceito de IoT especificamente na agricultura de precisão. O estudo destaca diferentes conceitos e tecnologias de transmissão, como LoRa e NFC, discutindo os problemas enfrentados e as metodologias propostas.

Uélison Jean L. dos Santos et al. (76) apresentaram o modelo AgriPrediction, que permite um framework, um mecanismo de previsão e um sistema de notificação para alcançar a agricultura de precisão como uma solução de baixo custo e viável para os agricultores. Sua contribuição reside na combinação da tecnologia WSN baseada em LoRa, com cobertura de curto e médio alcance, e o modelo de previsão ARIMA, possibilitando ações corretivas e melhor rendimento das culturas. O artigo detalha o passo a passo da pesquisa, métodos e testes, incluindo testes de consumo de bateria e a implementação de uma placa solar.

Sakshi Popli et al. (29) realizaram um estudo detalhado relacionado à alocação de recursos e técnicas de eficiência energética para IoT e NB-IoT. O manuscrito apresenta a Arquitetura em Camadas do IoT para especificar como o IoT funciona e uma análise comparativa detalhada do NB-IoT com outras tecnologias de comunicação IoT de baixa potência. O artigo inclui uma comparação das tecnologias IoT em formato de tabela, destacando suas principais características.

Anish Paul Antony et al. (30) apresentaram uma revisão do estado atual da IoT na agricultura de pequena escala, incluindo resumos de tecnologias de sensor e comunicação de última geração e exemplos reais de implementação de IoT em fazendas. O artigo de revisão apresenta dados interessantes e comparações entre diferentes tipos de comunicação, incluindo LoRa, além de tabelas e gráficos.

Muhammad Shoaib Farooq et al. (77) realizaram uma revisão sistemática da literatura apresentando uma discussão sobre artigos de pesquisa de alta qualidade publicados no domínio da agricultura baseada em IoT. O estudo analisa diferentes aplicações de agricultura IoT, sensores/dispositivos e protocolos de comunicação. Foi proposto um framework agrícola de agricultura inteligente baseado em IoT, consistindo em cinco componentes principais: aquisição de dados, plataforma comum, processamento de dados, visualização de dados e gerenciamento de sistema. Este framework pode ser usado com LoRa.

Por fim, Xiaofan Jiang et al. (78) apresentaram o design de uma rede de malha LPWAN híbrida para aplicação IoT que entrega vários quilômetros de cobertura com apenas nós de baixa potência, enquanto fornece excelente QoS. O trabalho aborda o desenvolvimento de WSN em larga escala, adequado para áreas de aplicação distintas com implantações no mundo real, e detalha todos os testes realizados para validar o projeto.

2.3 Considerações finais

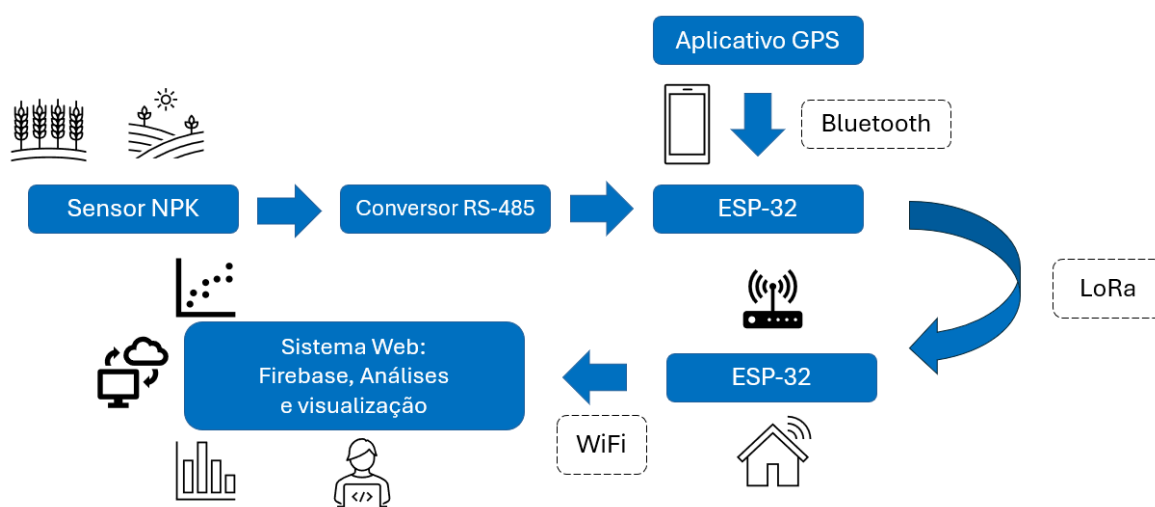
Este capítulo apresentou o estado da arte e o referencial teórico para os principais conceitos necessários, visando o entendimento do trabalho. No próximo capítulo, serão apresentadas as ferramentas e técnicas utilizadas para a elaboração deste trabalho.

3 Material e Métodos

Neste capítulo são apresentados os recursos e as metodologias utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho.

Com o objetivo de contribuir para maior clareza no entendimento do projeto, apresenta-se a seguir um diagrama de blocos, mostrado na Figura 6. Cada bloco do fluxograma é explicado nas seções seguintes. Neste diagrama, as setas mostram o fluxo dos dados que partem do sensor e vão até o sistema web, onde são armazenados e podem ser visualizados pelo usuário.

Figura 6 – Diagrama de blocos do trabalho.



Fonte: o autor.

3.1 Sensor NPK

O sensor a ser utilizado neste trabalho é o NPKCTH-S RS485 6 em 1, mostrado na Figura 7, e é capaz de monitorar as respectivas quantidades de nitrogênio, fósforo, potássio, condutividade, umidade e temperatura do solo em análise. Abaixo, na Tabela 3 e Tabela 4, são apresentadas as especificações do sensor NPK (79,80). Dentre as informações apresentadas estão as faixas de medição teóricas do sensor, além de aspectos elétricos e físicos.

Figura 7 - Sensor NPK RS485 6 em 1.



Fonte: (80).

Tabela 3 - Medição de parâmetros do solo

Parâmetro	Faixa de Medição	Precisão	Estabilidade a Longo Prazo	Tempo de resposta
Temperatura	-40°C a 80°C	±5°C (25°C)	≤0.1%/°C/ano	≤15s
Umidade	0-100%RH	2% dentro de 0-50%, 3% dentro de 50-100%	≤1%RH/ano	≤4s
Condutividade	0-20000μS/cm	0-10000 μS/cm: ±3%; 10000-20000 μS/cm: ±5%	≤1%uS/cm	≤1s
Nitrogênio, Fósforo, Potássio	1-2999 mg/kg (mg/L)	Resolução: 1 mg/kg (mg/L)	-	< 1s

Fonte: (81).

Tabela 4 - Especificações do sensor

Especificação	Detalhes
Fonte de alimentação	DC 4.5-30V
Consumo máximo de energia	0.5W@24V DC
Classe de proteção	IP68, uso em imersão prolongada em água
Comprimento do cabo	2M
Ambiente operacional	-40°C-80°C
Dimensões gerais	45 * 15 * 123mm

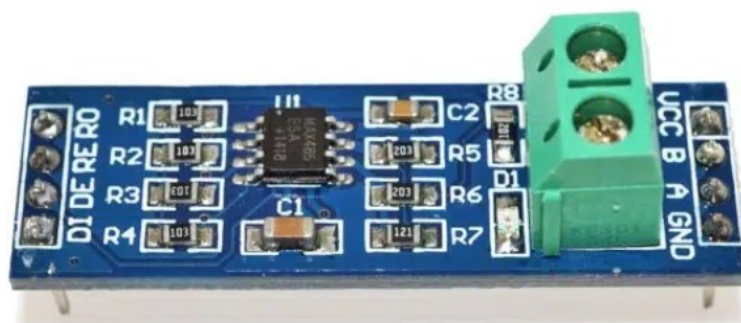
Fonte: (81).

3.2 Conversor RS-485

O conversor RS-485 para TTL (82) mostrado na Figura 8 foi utilizado para realizar a interface de comunicação entre o sensor NPK e o microcontrolador ESP32. Sua função consiste em converter os sinais diferenciais do padrão RS-485 em sinais de nível lógico TTL,

compatíveis com as portas seriais (UART) do microcontrolador. O módulo permite a aplicação do protocolo Modbus RTU, assegurando a transmissão dos dados. Na implementação, o dispositivo utiliza os pinos de recepção (RO) e transmissão (DI), além dos pinos de controle (RE e DE) para gerenciar o fluxo de dados durante a coleta dos parâmetros do solo (83).

Figura 8 - Módulo Conversor RS485



Fonte: (82).

3.3 Firebase

O Firebase foi utilizado como plataforma de Backend as a Service (BaaS) para o gerenciamento de dados e hospedagem da interface web. O Realtime Database, um banco de dados NoSQL baseado em nuvem, foi utilizado para armazenar, em formato JSON, as informações enviadas pelo ESP32, como os níveis de nitrogênio, fósforo, potássio, umidade, temperatura, condutividade e coordenadas geográficas, quando disponíveis. Esta ferramenta permite a sincronização de dados em tempo real, atualizando a aplicação web sem a necessidade de recarregar a página. Para o controle de acesso, utilizou-se o Firebase Authentication, que gerencia a identidade e a segurança dos usuários autorizados no sistema. Por fim, o Firebase Hosting foi empregado para a publicação e disponibilização global da aplicação desenvolvida em JavaScript e HTML (84,85).

3.4 Microcontrolador e comunicação

A plataforma ESP32 LoRa 868/915Mhz (86) é uma alternativa interessante no campo da Internet das Coisas. Sua relevância se deve à capacidade de combinar as capacidades do microcontrolador ESP32 com a tecnologia de comunicação de longo alcance LoRa, facilitando a conexão de dispositivos físicos à internet e a troca de informações entre sensores e atuadores.

Além disso, a placa ESP32 LoRa 868/915MHz possui um processador dual-core de 32 bits, operando a até 240MHz, 4MB de memória flash, 36 pinos GPIO e suporte a WiFi e Bluetooth 4.2, proporcionando uma ampla gama de possibilidades de conectividade. A inclusão de um display OLED de 0,96 polegadas facilita a visualização de informações diretamente no dispositivo, enquanto a conexão para antena SMA oferece flexibilidade na comunicação (86).

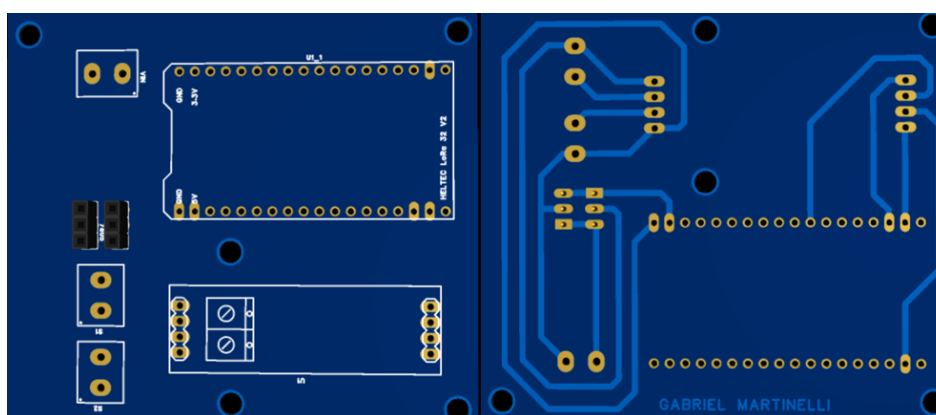
Outro fator decisivo para a escolha do ESP32 LoRa 868/915MHz é o chip LoRa integrado à placa, que facilita a implementação da comunicação LoRa. Por fim, a facilidade de implementação da comunicação deve ser levada em conta. Usando a linguagem C++, é possível programar o microcontrolador via IDE, um software gratuito que permite escrever, compilar e carregar código facilmente nas placas Arduino e ESP, tornando o processo de programação mais eficiente e intuitivo.

Utilizando dispositivos ESP32 LoRa 868/915MHz, os dados serão transmitidos de um ESP para outro via LoRa. Em seguida, utilizando a comunicação WiFi integrada deste microcontrolador, os dados são transferidos para o Firebase.

3.5 EasyEda

O software EasyEDA foi utilizado como a ferramenta de Electronic Design Automation (EDA) para a concepção e prototipagem da Placa de Circuito Impresso do sistema, como mostra a Figura 10. Através deste ambiente, foi realizada a captura do esquemático elétrico e o posterior roteamento das trilhas, assegurando a integração física e elétrica entre o microcontrolador ESP32, o conversor RS-485 e os circuitos de interface (87).

Figura 9 – Prototipagem do circuito.



Fonte: o autor.

3.6 MIT App Inventor

O MIT App Inventor foi empregado no desenvolvimento da aplicação móvel voltada para a interface entre o usuário e o sistema de transmissão. A plataforma, baseada em blocos de programação visual, permitiu a implementação da conectividade Bluetooth Low Energy para o estabelecimento de um canal de comunicação sem fio com o transmissor LoRa. O aplicativo, cuja interface é mostrada na Figura 10, gerencia a coleta das coordenadas de latitude e longitude diretamente dos sensores de geolocalização do smartphone, encapsulando essas informações em pacotes de dados. Uma vez estabelecida a conexão via Bluetooth, o aplicativo envia as coordenadas para o dispositivo transmissor que, por sua vez, realiza o encaminhamento do pacote para o receptor remoto através da camada física LoRa (88).

Figura 10 – Interface gráfica do aplicativo.



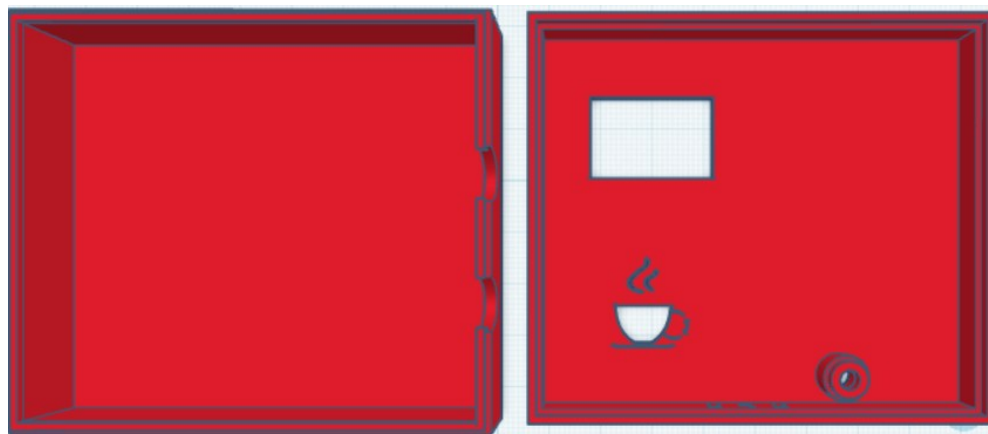
Fonte: o autor.

3.7 Tinkercad

O software Tinkercad foi utilizado como a ferramenta de modelagem tridimensional para o desenvolvimento dos cases dos nós transmissor e receptor, como mostra a Figura 11. A plataforma permitiu a concepção de gabinetes dimensionados especificamente para acondicionar a placa de circuito impresso, o microcontrolador ESP32 e os módulos de alimentação, garantindo o alojamento dos componentes e a proteção mecânica necessária para os ensaios em campo. Após a etapa de modelagem, os arquivos foram exportados em formato

padrão para o fatiamento e posterior fabricação física por meio de tecnologia de impressão 3D, consolidando o protótipo final do dispositivo IoT (89).

Figura 11 – Prototipagem do case.



Fonte: o autor.

3.8 Etapas de desenvolvimento

Para a realização deste trabalho, primeiramente foi necessário estudar a teoria sobre sistemas de IoT para agricultura, sobre tecnologia LoRa e outros aspectos importantes para a implementação do projeto. Em seguida, foi implementada a comunicação ponto a ponto entre módulos LoRa, onde foram testados algoritmos para recepção e transmissão de pacotes. Após a verificação do funcionamento da comunicação, realizou-se a integração do sensor NPK ao microcontrolador ESP32, que atua como nó transmissor, sendo testado inicialmente de forma isolada para garantir a integridade das leituras.

Com a validação dos componentes individuais, o sistema completo foi montado em protoboard para a realização de testes integrados de hardware e software. Esta etapa permitiu identificar instabilidades e ajustar as rotinas de comunicação antes da transição para o hardware definitivo. Após a estabilização do protótipo, procedeu-se ao design e montagem da placa de circuito impresso utilizando o software EasyEDA, garantindo maior robustez física, proteção dos componentes e redução de ruídos nas conexões.

Na etapa final, implementou-se a transmissão dos dados coletados pelo sensor até o nó receptor e sua posterior integração com o Firebase. Para suprir a necessidade de georreferenciamento exato das medições, desenvolveu-se um aplicativo via MIT App Inventor. Esta ferramenta permitiu que o sistema obtivesse as coordenadas de latitude e longitude em tempo real através do GPS do dispositivo móvel, enviando-as ao transmissor via Bluetooth. Com os dados consolidados no Firebase, foi criada uma aplicação WEB usando JavaScript e

HTML para a visualização e interpretação remota das informações obtidas. Para a calibração do sensor NPK e os testes de cobertura LoRa em ambiente rural, adotou-se a metodologia detalhada nas subseções seguintes.

3.8.1 Análise das amostras de solo

Com o intuito de melhorar o entendimento acerca da metodologia de análise das amostras de solo, separou-se esta etapa em três passos apresentados na Figura 12 e abordados nas próximas subseções.

Figura 12 – Diagrama das etapas para análise de amostras do solo.



Fonte: o autor.

Dessa forma, antes da análise das amostras de solo certificadas, cujas propriedades físico-químicas eram previamente conhecidas por meio de laudos técnicos, foi estabelecido um protocolo experimental preliminar para validar a metodologia empregada e assegurar a confiabilidade dos resultados. Esse protocolo foi estruturado em duas etapas principais: (I) validação do sensor por meio de soluções aquosas padronizadas e (II) testes exploratórios para caracterização preliminar de amostras de solo com propriedades desconhecidas.

Na etapa (I), a validação em meio aquoso foi realizada através da preparação de soluções estoque de Fósforo (P) e Potássio (K). Para o Potássio, utilizou-se o Cloreto de Potássio, KCl , enquanto para o Fósforo empregou-se o Fosfato de Potássio Dibásico Anidro, K_2HPO_4 , ambos dimensionados para uma concentração nominal de 1000 mg/L. A partir dessas soluções, foram realizados ensaios com concentrações variadas para verificar a linearidade do sensor.

Cabe ressaltar que, embora o sensor empregado possua a capacidade nominal de detecção de nitrogênio (N), este macronutriente foi excluído do escopo analítico desta pesquisa. Tal decisão fundamenta-se na elevada dinâmica e volatilidade do nitrogênio na matriz do solo, o qual está sujeito a perdas rápidas por volatilização na forma de amônia NH_3 e processos de lixiviação e desnitrificação. Dada a complexidade e a velocidade das transformações químicas no ciclo do nitrogênio, a obtenção de uma curva de calibração estável e reproduzível em ambiente laboratorial torna-se limitada para sensores baseados em condutividade elétrica

aparente, uma vez que as concentrações iônicas podem flutuar significativamente durante o tempo de estabilização. Portanto, visando assegurar o rigor estatístico e a acurácia na validação do sistema IoT, optou-se pelo foco exclusivo nos elementos fósforo e potássio, que apresentam maior estabilidade na fase sólida do solo sob condições controladas (90).

Na etapa (II), os testes exploratórios focaram na definição do tempo de resposta ideal para a estabilização das leituras no solo. Foram avaliados intervalos de 10, 20 e 30 minutos após a adição de água e homogeneização da amostra. Observou-se que o tempo de 20 minutos apresentava o melhor equilíbrio entre a estabilidade do sinal e a viabilidade operacional, sendo este o intervalo adotado como padrão para o experimento principal.

Na etapa (III), finalizado o protocolo preliminar, a análise das amostras de solo certificadas P3, P4, A5, A7, seguiu o fluxo metodológico estruturado em três passos fundamentais.

O primeiro passo consistiu na determinação da umidade e padronização das amostras. Para garantir que todas partissem de um estado conhecido, utilizou-se o método gravimétrico em triplicata, dividindo cada amostra em três placas de Petri. Estas foram pesadas e levadas à estufa a 105 °C por 24 horas. Após o ciclo de secagem, as massas secas foram aferidas para o cálculo da umidade residual e, em seguida, as três partes de cada solo foram reunificadas em uma única amostra composta de massa seca conhecida (91).

O segundo passo compreendeu o ensaio de variação hídrica controlada. Com base na massa seca total, foram adicionados volumes incrementais de água destilada para simular diferentes níveis de umidade no solo. Após cada adição, a mistura foi rigorosamente homogeneizada e mantida em repouso pelo tempo de 20 minutos estabelecido anteriormente. A massa da amostra úmida foi monitorada em balança analítica a cada etapa, permitindo a correlação exata entre o teor de água e a resposta elétrica do sistema.

Por fim, o terceiro passo tratou da coleta de dados e geração das curvas de resposta. Utilizando o sensor NPK integrado ao microcontrolador ESP32, as leituras foram registradas para cada variação de umidade, desde o solo seco até o ponto de saturação. Esse procedimento permitiu identificar a faixa de operação do sensor e coletar os dados necessários para o confronto com os laudos laboratoriais das áreas certificadas P3, P4, A5, A7, subsidiando a análise e a validação da acurácia do sistema IoT proposto.

4 Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos durante o desenvolvimento, a implementação e a validação do sistema proposto. Inicialmente, detalha-se a concepção da plataforma e dos dispositivos IoT, englobando as características do hardware, o funcionamento da interface móvel com georreferenciamento via BLE e a operação da interface web.

Na sequência, são avaliados os testes práticos de comunicação da rede LoRa. Posteriormente, apresenta-se a caracterização do transdutor NPK, abrangendo a determinação do tempo de estabilização das leituras e a análise do comportamento do sensor frente a diferentes amostras de solo e teores de umidade. Por fim, realiza-se um comparativo de viabilidade econômica entre a aplicação do sistema IoT e os métodos tradicionais de análise laboratorial.

4.1 Plataforma e dispositivo IoT

Nesta seção, apresentam-se os resultados referentes ao desenvolvimento físico e lógico da plataforma, abrangendo desde a integração do hardware até as interfaces de software que compõem o ecossistema do sistema de monitoramento NPK.

4.1.1 Hardware

A consolidação do hardware do sistema IoT ocorreu com a transição da fase de prototipagem em protoboard para a implementação de uma placa de circuito impresso desenvolvida no software EasyEDA. Durante os ensaios iniciais, verificou-se que a utilização de conexões via cabos jumpers constituía a principal fonte de erros no protocolo Modbus RTU, gerando falhas intermitentes de comunicação e instabilidade nas leituras do sensor NPK devido a problemas de continuidade física. A migração para a PCB eliminou estas vulnerabilidades, garantindo conexões permanentes e conferindo ao nó transmissor e ao nó receptor uma robustez mecânica indispensável para a operação em ambiente real. Além disso, o design da placa permitiu um dispositivo mais compacto e profissional, eliminando o risco de desconexões acidentais durante o manuseio.

Uma caixa personalizada foi desenvolvida para acondicionar o hardware do nó transmissor, visando posicionar a placa de circuito e antena de forma adequada para os testes a

serem realizados. Esta caixa foi implementada por meio de um software de modelagem 3D, o Tinkercad, e é mostrada na Figura 13. O nó receptor também foi colocado em uma caixa modelada, mostrada na Figura 14.

Figura 13 – Dispositivo transmissor durante realização dos experimentos.



Fonte: o autor.

Figura 14 – Dispositivo receptor.



Fonte: o autor.

4.1.2 Interface móvel e georreferenciamento via BLE

O aplicativo desenvolvido na plataforma MIT App Inventor atua na aquisição e encaminhamento de dados geoespaciais ao nó transmissor. A conexão entre o dispositivo móvel e o nó transmissor é estabelecida via protocolo Bluetooth Low Energy, operando na frequência de 2,4 GHz. Esta tecnologia foi selecionada por permitir a troca de pacotes de dados com baixo consumo de energia e pela facilidade de pareamento com o microcontrolador ESP32, que possui suporte nativo à pilha de protocolos *bluetooth*.

A funcionalidade do aplicativo consiste em acessar o GPS integrado do *smartphone* para capturar as coordenadas de latitude e longitude no momento da medição. Esses dados são transmitidos via BLE para o nó transmissor, que os anexa ao pacote de dados NPK antes do envio via LoRa. Em uma aplicação comercial, este procedimento assegura a rastreabilidade de cada análise, permitindo a identificação da localização exata de cada ponto amostrado.

A obtenção das coordenadas do transmissor, aliada à posição fixa e conhecida do nó receptor, possibilita a geração de mapa de cobertura, fornecendo dados sobre o alcance efetivo da tecnologia LoRa na topografia da fazenda, e auxiliando na identificação de zonas de sombra no enlace de comunicação.

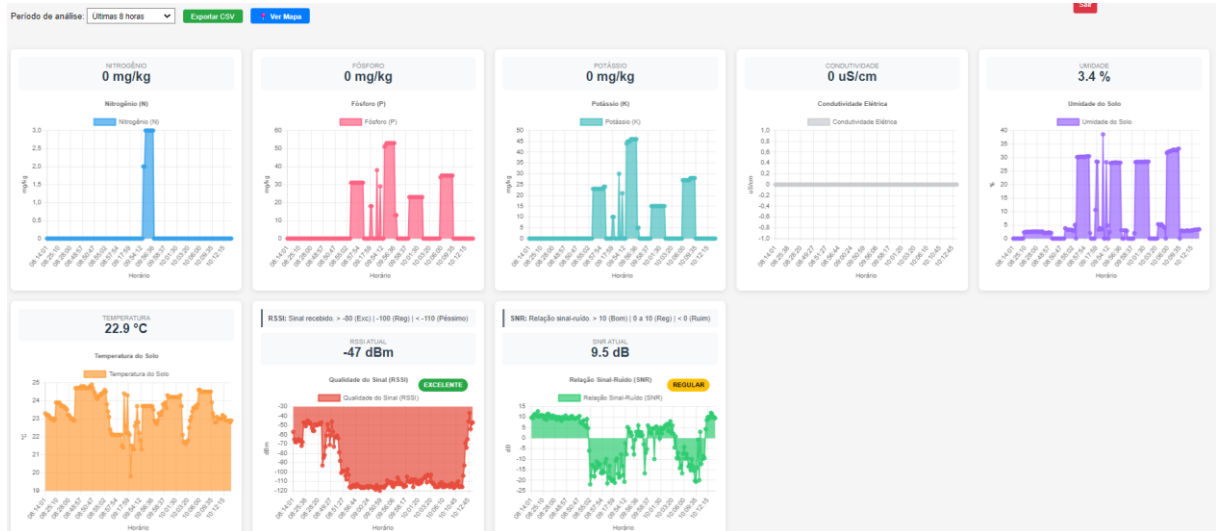
4.1.3 Interface Web

O ecossistema de software é finalizado com a integração do nó receptor à plataforma Firebase, que atua como o Backend as a Service (BaaS) do sistema. O fluxo de dados inicia-se após a decodificação do pacote LoRa pelo ESP32 receptor, que utiliza sua conectividade WiFi nativa e a pilha de protocolos TCP/IP para encaminhar as informações coletadas ao Realtime Database. Nesta camada, os dados de NPK e geolocalização são persistidos em uma estrutura NoSQL baseada em JSON, o que garante alta disponibilidade no armazenamento das informações provenientes do campo.

A interface Web, desenvolvida com tecnologias HTML5 e JavaScript, consome as APIs do Firebase para fornecer uma visualização dinâmica e centralizada dos parâmetros. O diferencial técnico desta implementação reside na sincronização em tempo real: a entrada de um novo pacote de dados no banco de dados dispara automaticamente um evento de atualização no frontend, permitindo que as medições sejam refletidas instantaneamente. O Dashboard Web

de monitoramento em tempo real, ilustrado na Figura 15, apresenta os níveis de nutrientes e o status de conectividade de forma intuitiva para o usuário.

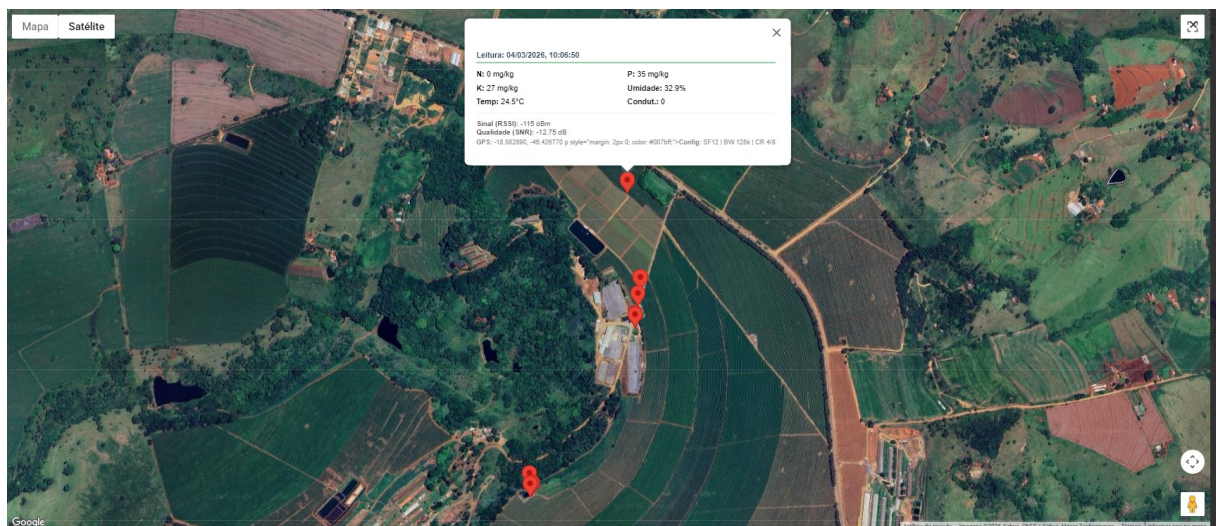
Figura 15 – Dashboard Web de monitoramento em tempo real.



Fonte: o autor.

Por fim, o sistema integra a API do Google Maps para viabilizar a visualização geoespacial das medições. Através desta ferramenta, as coordenadas de latitude e longitude capturadas pelo nó transmissor são processadas para a plotagem automática de marcadores em um mapa. Este recurso resulta no mapa de pontos de análise do solo, demonstrado na Figura 16, que permite identificar a localização de cada amostra e correlacionar a distribuição de fertilizantes com a topografia da área monitorada. Essa arquitetura modular entre a persistência no Firebase e a visualização via Google Apps confere ao sistema IoT a robustez necessária para aplicações de agricultura de precisão e diagnóstico de cobertura de rede.

Figura 16 – Mapa de pontos de análise do solo.

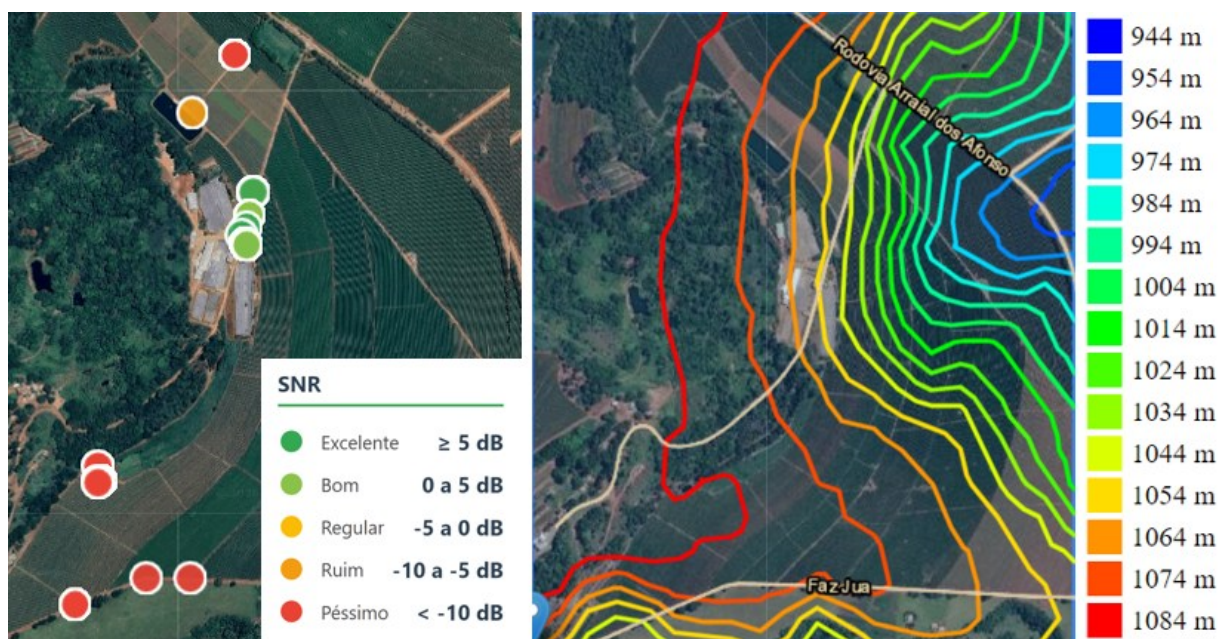


Fonte: o autor.

4.2 Avaliação de testes LoRa

O teste de cobertura LoRa realizado numa fazenda tem objetivo de testar de forma introdutória o desempenho do sistema em um ambiente próximo à realidade de uso do mesmo. A Figura 17 mostra dois mapas da área onde foi realizado o experimento. No primeiro mapa estão os pontos coletados, identificados por cores considerando o SNR obtido na transmissão de cada ponto. No segundo mapa são mostradas curvas de nível obtidas pelas informações da base de dados do Google Maps. Os pontos em verde são resultado de transmissões feitas próximas à sede da fazenda. Os parâmetros utilizados foram $SF = 12$, $BW = 125kHz$ e $CR = 4/8$, configuração que assegura a máxima robustez da comunicação e o menor limiar de sensibilidade do receptor.

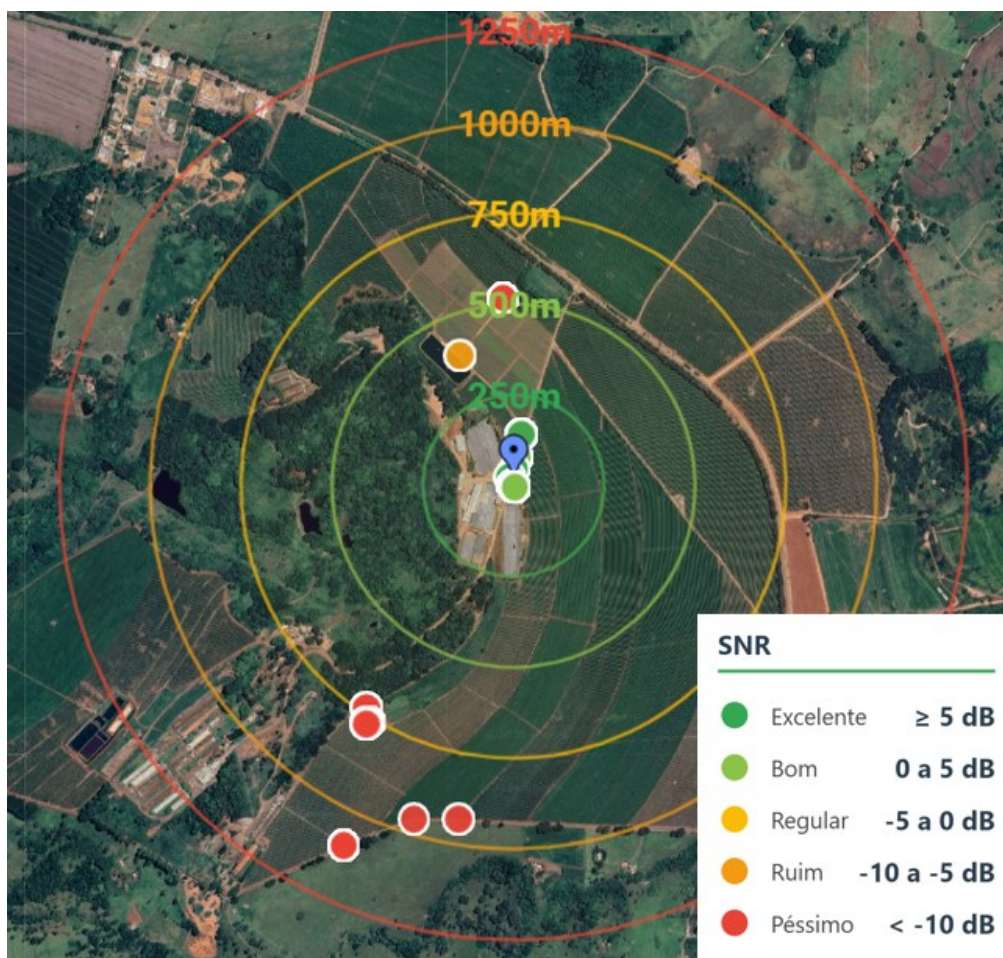
Figura 17 – Mapa com amostras coletadas à esquerda e linhas nível à direita.



Fonte: o autor.

Na Figura 18 os pontos do experimento são mostrados juntamente com círculos medindo a distância em relação ao dispositivo receptor na sede da fazenda. É possível ver que a 500 metros de distância, já há um ponto com SNR de -12 dB, mas que o alcance máximo chegou a mais de 1 km. É importante destacar que foram utilizados apenas dispositivos numa comunicação ponto a ponto, isto é, sem a utilização de *gateway* e que o dispositivo receptor estava a apenas um metro e meio do solo, o que dificulta obter um alcance maior.

Figura 18 – Mapa com círculos de distância.



Fonte: o autor.

O parâmetro RSSI não foi utilizado nas análises porque, para um SNR negativo, o RSSI representa mais ruído do que o próprio sinal.

4.3 Análise do sensor NPK e das amostras de solo

A avaliação inicial do sistema IoT baseou-se na resposta do sensor NPK em meio aquoso, utilizando soluções estoque de fósforo (P) e potássio (K) com concentrações conhecidas de 0 mg/L, 10 mg/L, 25 mg/L, 50 mg/L, 100 mg/L e 200 mg/L. Esta etapa permitiu isolar o comportamento do transdutor de variáveis complexas inerentes à matriz sólida, como a porosidade e a densidade do solo, focando na sensibilidade iônica direta. Para assegurar a integridade analítica das amostras, a preparação foi monitorada por meio de um pHmetro de bancada, registrando-se não apenas o índice de acidez, mas também o potencial elétrico em milivolts (mV). O monitoramento foi feito com o objetivo de garantir a estabilidade eletroquímica das soluções estoque durante a calibração, certificando que as leituras obtidas

pelo sistema IoT fossem resultado exclusivo da variação de solutos e não de derivas galvânicas ou instabilidades químicas do meio.

Observou-se que as leituras obtidas pelo sensor apresentam uma correlação positiva com o incremento da concentração de solutos, embora a magnitude dessa resposta varie significativamente entre os nutrientes analisados. Conforme os dados apresentados na Tabela 5, o sensor demonstrou uma tendência de superestimar concentrações baixas de fósforo, apresentando uma leitura de 24 mg/L para uma concentração real de 10 mg/L, enquanto em concentrações elevadas, 200 mg/L, a leitura de 202,8 mg/L indicou um erro relativo significativamente menor, aproximando-se da estabilidade analítica.

Tabela 5 – Dados da análise da solução de estoque K_2HPO_4 .

Concentração real (mg/L)	pH calibrado	mV	Leitura do sensor (mg/L)	Erro relativo (%)
0	7,09	0	0,0	0%
10	7,12	-4	24,0	+140%
25	7,19	-4	32,8	+31,2%
50	7,21	-10	51,0	+2%
100	7,12	-4	91,0	-9%
200	7,16	-7	202,8	-1,4%

Fonte: o autor.

Diferentemente do fósforo, o potássio apresentou um comportamento de subestimação acentuada em faixas superiores de concentração. Para uma solução de 200 mg/L de K, o sensor mediu uma média de 78 mg/L, o que sugere um limite de saturação na curva de resposta do sensor ou uma sensibilidade reduzida do transdutor aos íons K^+ em comparação aos fosfatos.

Tabela 6 – Dados da análise da solução de estoque KCl .

Concentração real (mg/L)	pH calibrado	mV	Leitura do sensor (mg/L)	Erro relativo (%)
0	7,54	0	0,0	0%
10	7,06	0	10,0	0%
25	7,06	0	13,0	-48,0%
50	7,03	+2	25,0	-50,0%
100	7,06	0	40,0	-60,0%
200	7,06	0	78,0	-61,0%

Fonte: o autor.

Essa discrepância pode ser quantificada pelo erro relativo ϵ , definido pela equação:

$$\epsilon = \frac{C_{sensor} - C_{real}}{C_{real}}$$

sendo C_{sensor} o valor reportado pelo dispositivo e C_{real} a concentração nominal da solução. A análise dos dados revela que, para o potássio, o erro relativo aumenta conforme a solução atinge níveis de maior salinidade, indicando que o algoritmo de conversão interna do sensor pode não ser linear para toda a faixa operacional pretendida.

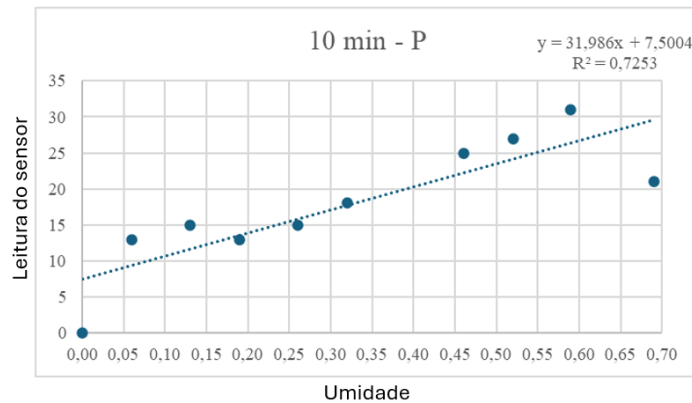
A repetibilidade do sistema, no entanto, mostrou-se elevada em meio líquido. Os dados de triplicata apresentaram desvios padrão nulos em diversas faixas de medição, como pode ser observado nas tabelas no anexo 1, reforçando que o sensor possui estabilidade de leitura, embora sua acurácia dependa de uma calibração externa robusta. Conclui-se que, em meio aquoso, o desempenho é condicionado pela força iônica da solução, exigindo que o sistema IoT implemente algoritmos de compensação para traduzir a leitura do sensor a estimativas mais próximas das concentrações reais.

4.3.1 Determinação do tempo de análise do solo

Para a definição do protocolo experimental, foi necessário identificar, o tempo necessário para a estabilização das leituras do sensor após a homogeneização da matriz do solo com água. Como o dispositivo opera fundamentado na condutividade elétrica aparente, o equilíbrio iônico entre a solução do solo e a interface dos eletrodos não ocorre de forma instantânea, exigindo um período de latência para a solubilização dos nutrientes. Nesse sentido, foram conduzidos testes comparativos nos intervalos de 10, 20 e 30 minutos, avaliando-se o coeficiente de determinação R^2 , que reflete o grau de ajuste e a linearidade da relação entre concentração e resposta do sensor, e a inclinação da reta de regressão, que atua como um indicador da sensibilidade do sensor, para o fósforo e o potássio.

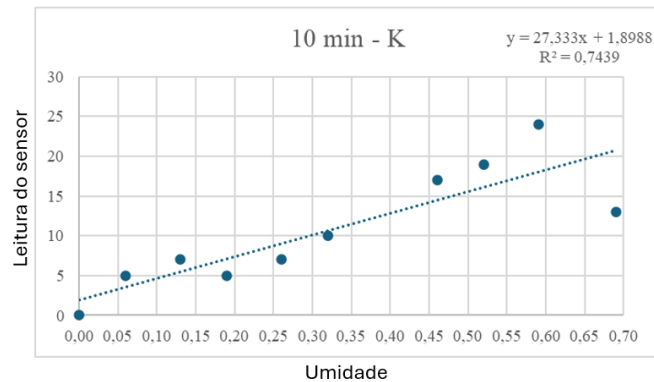
Nos ensaios realizados com o tempo de 10 minutos, as leituras apresentaram uma instabilidade acentuada, com valores de R^2 situados em 0,72 para o fósforo e 0,74 para o potássio, como mostram a Figura 19 e a Figura 20. Este comportamento sugere que, em intervalos reduzidos, o sistema ainda sofre interferências resultantes da falta de homogeneização do solo. Consequentemente, a inclinação da reta nestes casos foi reduzida, evidenciando uma baixa capacidade do sensor em responder a variações incrementais de umidade.

Figura 19 – Resposta da concentração de fósforo para tempo de análise de 10 minutos.



Fonte: o autor.

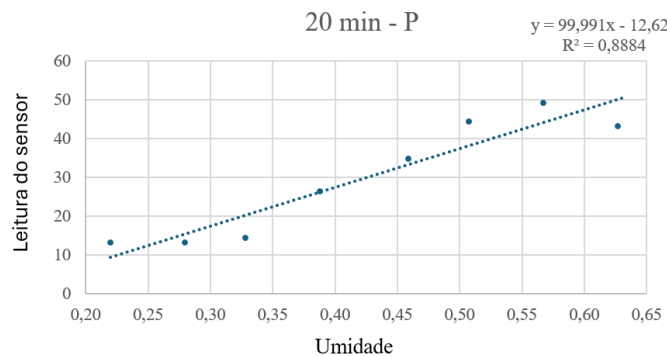
Figura 20 – Resposta da concentração de potássio para tempo de análise de 10 minutos.



Fonte: o autor.

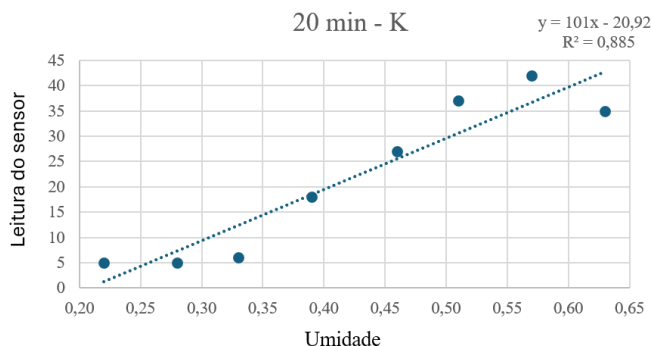
O desempenho do sistema IoT demonstrou uma evolução significativa ao atingir o intervalo de 20 minutos, alcançando um R^2 de 0,88 para ambos os nutrientes analisados, como mostram a Figura 21 e Figura 22. Além da melhoria na linearidade, observou-se que a inclinação da reta para o potássio atingiu seu valor máximo neste período, indicando o ponto de maior sensibilidade do dispositivo. Este fenômeno ocorre porque o tempo de 20 minutos permite uma interação mais completa entre a água e os íons do solo.

Figura 21 – Resposta da concentração de fósforo para tempo de análise de 20 minutos.



Fonte: o autor.

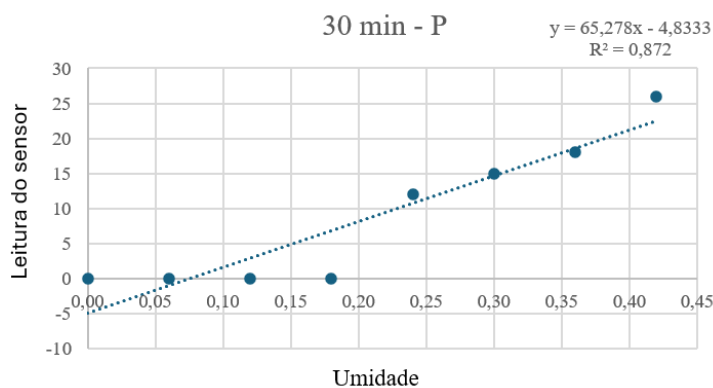
Figura 22 – Resposta da concentração de potássio para tempo de análise de 20 minutos.



Fonte: o autor.

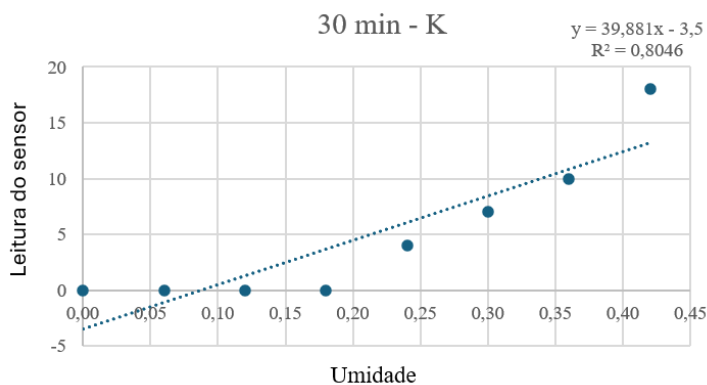
Em contrapartida, os testes estendidos para 30 minutos revelaram um declínio na performance do sensor. Verificou-se uma queda no R^2 do Fósforo para 0,87 e uma redução mais severa no Potássio, que atingiu 0,80, como pode ser observado na Figura 23 e na Figura 24. A redução simultânea na inclinação das retas indica que o sensor começou a perder sensibilidade.

Figura 23 – Resposta da concentração de fósforo para tempo de análise de 30 minutos.



Fonte: o autor.

Figura 24 – Resposta da concentração de potássio para tempo de análise de 30 minutos.



Fonte: o autor.

Portanto, o intervalo de 20 minutos foi estabelecido como o padrão operacional para o trabalho, por representar o ponto ótimo de convergência entre linearidade, sensibilidade e eficiência temporal no monitoramento IoT. A Tabela 7 sintetiza os coeficientes de determinação para os cenários analisados.

Tabela 7 – Parâmetros de R^2 e Inclinação em função do tempo de análise.

Tempo de Análise (min)	R^2 (Fósforo)	R^2 (Potássio)
10	0,72	0,74
20	0,88	0,88
30	0,87	0,80

Fonte: o autor.

4.3.2 Análise das amostras de solo

A validação do sistema em matriz sólida iniciou-se pela determinação da umidade residual e estabelecimento da massa seca de referência (91). Cada amostra de solo foi submetida a um controle gravimétrico, sendo fracionada em triplicatas de 40g de massa úmida em placas de Petri e levada à estufa a 105 °C por 24 horas. Após o ciclo de secagem, a pesagem das massas secas permitiu quantificar a perda de água e, consequentemente, a umidade inicial de cada lote. A reunificação das três placas em um único béquer consolidou a massa seca total utilizada nos ensaios, garantindo que todos os cálculos posteriores fossem expressos em base seca (BS). Este procedimento foi realizado para aumentar a precisão dos resultados pois permitiu correlacionar cada leitura do sensor a um teor hídrico exato, eliminando as variáveis de umidade ambiental pré-existent.

Tabela 8 - Determinação de Umidade das amostras.

<i>ID da amostra</i>	Massa úmida Média (g)	Desvio padrão Massa Úmida	Massa Seca Média (g)	Desvio padrão Massa Seca	Umidade BS Média (g H ₂ O/g MS)	Desvio padrão Umidade BS
Área P3	40,050	±0,026	36,957	±0,100	0,084	±0,004
Área P4	40,017	±0,012	37,413	±0,078	0,070	±0,002
Área A5	40,030	±0,017	37,537	±0,060	0,066	±0,001
Área A7	40,013	±0,006	37,107	±0,006	0,078	±0,000

Fonte: o autor.

Com o protocolo de 20 minutos de estabilização definido, os dados foram analisados por regressão linear e Análise de Covariância (ANCOVA), considerando a leitura do sensor como variável dependente, a umidade do solo como covariável contínua e a área de coleta como fator categórico. Inicialmente foi testada a interação entre área e umidade para verificar diferenças entre as inclinações das regressões.

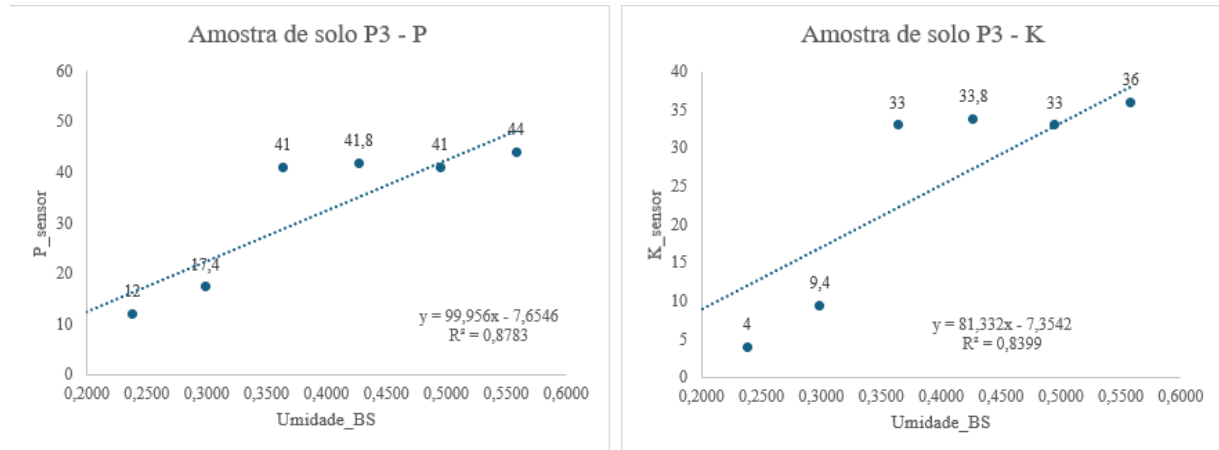
Os modelos lineares individuais apresentaram coeficientes de determinação elevados, superando 0,87 para o fósforo e 0,83 para o potássio em todas as amostras. O teste de interação entre o fator área e a covariável umidade não foi significativo ($p > 0,05$), indicando ausência de diferenças entre as inclinações das regressões e, portanto, paralelismo estatístico entre as curvas. Esse paralelismo estatístico sugere que o incremento na leitura do sensor é dominado quase que exclusivamente pela variação da umidade e, consequentemente, pela condutividade elétrica do meio, sobrepondo-se às características químicas intrínsecas da origem de cada solo.

Durante a construção dessas curvas de calibração, identificou-se uma janela de trabalho ideal para o sensor. Em amostras excessivamente secas, a baixa condutividade elétrica resultou em leituras nulas. Em contrapartida, em solos saturados de umidade, observou-se um efeito de saturação (*plateau*) onde o sensor atinge seu limite de sensibilidade, evidenciando que a maior estabilidade do sistema IoT ocorre em teores intermediários. Nessa zona de operação, as cinco medições consecutivas realizadas para cada ponto de umidade apresentaram desvios padrão praticamente nulos, confirmando a alta repetibilidade do hardware.

Para a amostra da área A5, a título de exemplo, o desvio padrão não ultrapassou 0,45 para as medidas de fósforo e potássio, enquanto para a umidade lida pelo sensor, o desvio

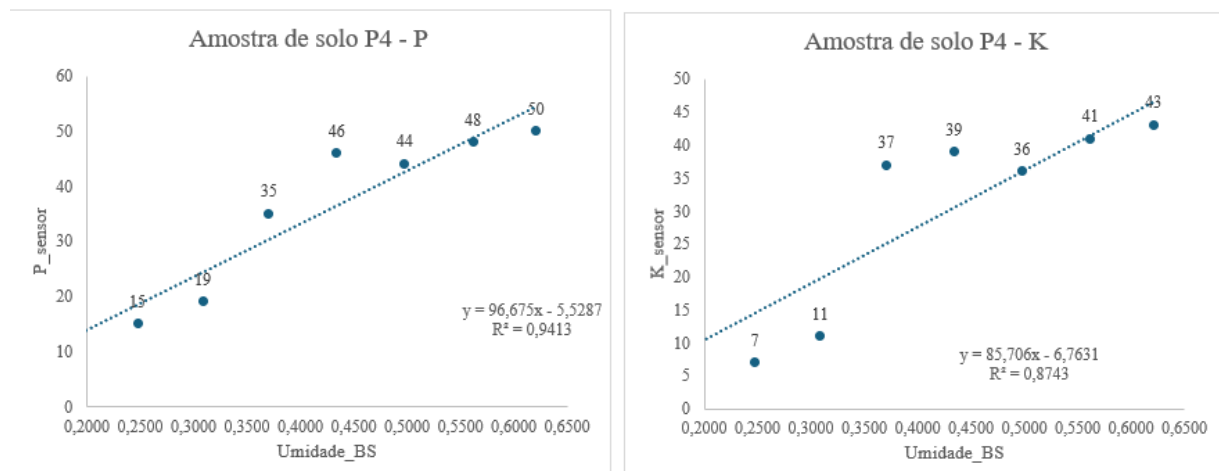
máximo foi de apenas 0,08%. As figuras a seguir ilustram as curvas de resposta do sensor conforme a variação da umidade.

Figura 25 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área P3.



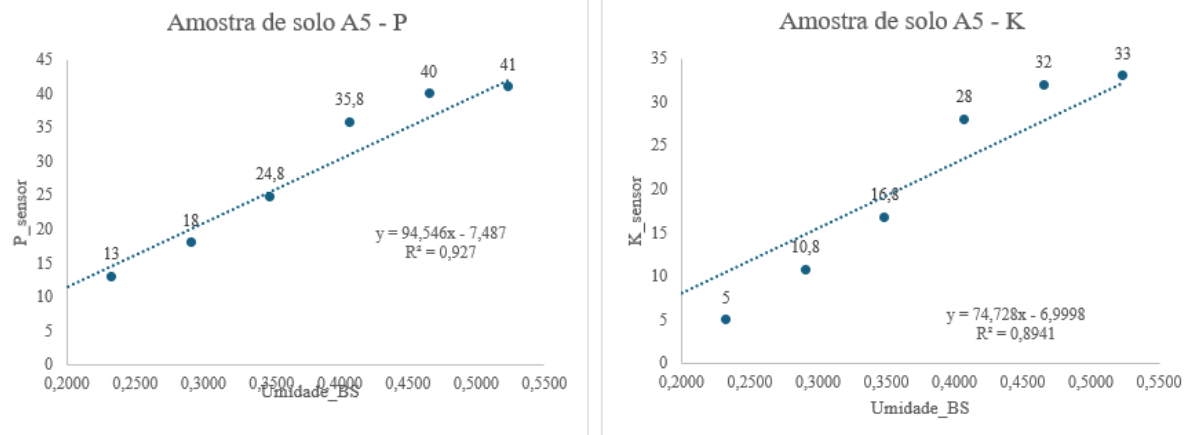
Fonte: o autor.

Figura 26 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área P4.



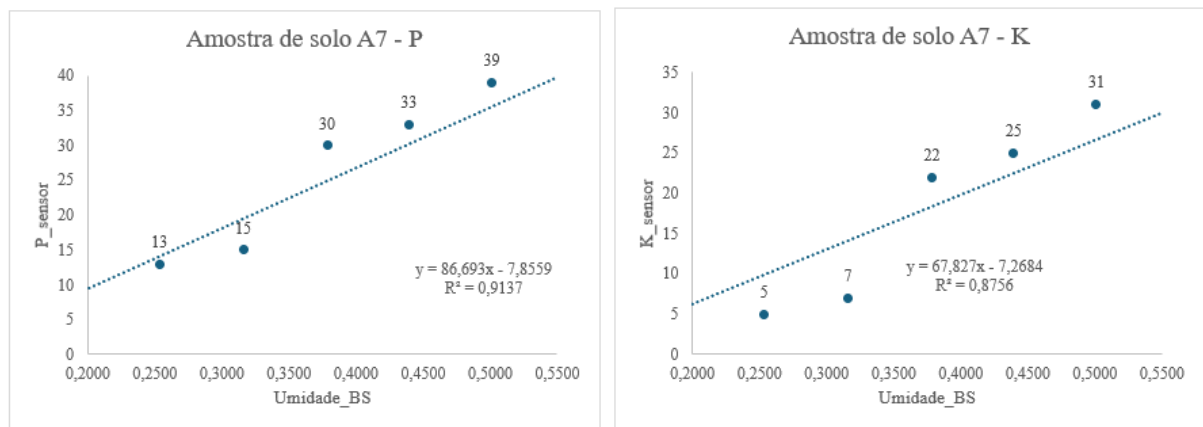
Fonte: o autor.

Figura 27 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área A5.



Fonte: o autor.

Figura 28 – Curva de resposta do sensor em função da umidade do solo para a área A7.



Fonte: o autor.

Os pontos correspondentes a leituras nulas (solo excessivamente seco) e às leituras saturadas foram excluídos da regressão por se encontrarem fora da faixa linear de resposta do sensor. As medidas para todos os intervalos de umidade, incluindo os que resultaram em medidas zeradas ou saturadas estão nas Tabelas 9 a 13, para as áreas P3, P4, A5 e A7, respectivamente.

Tabela 9 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área P3.

Etapa	Água adicionada acumulada (mL)	Umidade Medida pelo Sensor (%)	Umidade BS	P sensor (mg/kg)	K sensor (mg/kg)
1	0,00	4,00	0,0000	0	0
2	5,56	6,00	0,0612	0	0
3	16,68	7,30	0,1179	0	0
4	33,36	7,20	0,1790	0	0
5	55,60	8,38	0,2379	12	4
6	83,40	12,00	0,2988	17,4	9,4
7	116,76	24,60	0,3636	41	33
8	155,68	26,30	0,4270	41,8	33,8
9	200,16	26,50	0,4950	41	33
10	250,20	27,20	0,5583	44	36

Fonte: o autor.

Tabela 10 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área P4.

Etapa	Água adicionada acumulada (mL)	Umidade Medida pelo Sensor (%)	Umidade BS	P sensor (mg/kg)	K sensor (mg/kg)
1	0,00	3,86	0,0000	0	0
2	5,64	6,54	0,0611	0	0
3	16,92	7,82	0,1235	0	0
4	33,84	7,54	0,1863	12	4
5	56,40	8,40	0,2474	15	7
6	84,60	14,16	0,3085	19	11
7	118,44	23,44	0,3706	35	37
8	157,92	26,60	0,4339	46	39
9	203,04	26,64	0,4977	44	36
10	253,80	27,16	0,5617	48	41
11	310,20	28,00	0,6208	50	43

Fonte: o autor.

Tabela 11 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área A5.

Etapa	Água adicionada acumulada (mL)	Umidade Medida pelo Sensor (%)	Umidade BS	P sensor (mg/kg)	K sensor (mg/kg)
1	0,00	4,66	0,0000	0	0
2	5,66	5,68	0,0582	0	0
3	16,98	6,60	0,1163	0	0
4	33,96	7,68	0,1745	0	0
5	56,60	8,60	0,2327	13	5
6	84,90	14,68	0,2908	18	10,8
7	118,86	22,10	0,3490	24,8	16,8
8	158,48	25,90	0,4072	35,8	28
9	203,76	27,12	0,4653	40	32
10	254,70	27,30	0,5235	41	33

Fonte: o autor.

Tabela 12 – Medidas do sensor em função da umidade do solo para a área A7.

Etapa	Água adicionada acumulada (mL)	Umidade Medida pelo Sensor (%)	Umidade BS	P sensor (mg/kg)	K sensor (mg/kg)
1	0,00	4,90	0,0056	0	0
2	5,59	5,34	0,0684	0	0
3	16,77	6,24	0,1422	0	0
4	33,54	6,32	0,1895	0	0
5	55,90	7,90	0,2534	13	5
6	83,85	8,34	0,3159	15	7
7	117,39	24,34	0,3784	30	22
8	156,52	25,62	0,4394	33	25
9	201,24	28,14	0,5011	39	31
10	251,55	28,82	0,5618	39	31

Fonte: o autor.

Por fim, a Tabela 13 apresenta os valores reais de fósforo, potássio e pH, medidos em um laboratório especializado. O laboratório entrega os resultados em mg/dm^3 . Como a análise é feita com a amostra de solo seca, utilizamos a aproximação de $\text{mg/dm}^3 \approx \text{mg/kg}$. Essa simplificação é válida para solos minerais secos, que possuem densidade próxima de 1. Assim, conseguimos comparar os dados do laboratório diretamente com os valores medidos pelo sensor NPK.

Por fim, para validar o potencial prático do sensor NPK no sistema IoT, os valores medidos pelo hardware foram confrontados com a análise química real das amostras. A Tabela 13 e Tabela 14 apresentam uma comparação direta entre o que foi medido pelo sensor, o valor

real atestado pelo laboratório, a umidade registrada no momento da leitura e o erro relativo entre o valor medido e o valor real, para o fósforo e o potássio, respectivamente.

Tabela 13 – Comparativo entre concentração de fósforo do laboratório x valor medido pelo sensor NPK.

Amostra	Umidade sensor (%)	P (mg/kg) Sensor	P (mg/kg) Laboratório	Erro relativo (P) (%)
Área P3	24,6	41	30	+36,6
Área P4	23,44	35	30	+16,6
Área A5	14,68	18	15	+20,0
Área A7	8,3	15,0	14,0	+7,1

Fonte: o autor.

Tabela 14 – Comparativo entre concentração de potássio do laboratório x valor medido pelo sensor NPK.

Amostra	Umidade sensor (%)	K (mg/kg) Sensor	K (mg/kg) Laboratório	Erro relativo (K) (%)
Área P3	24,6	33	70	-52,8
Área P4	26,6	39	57	-31,5
Área A5	27,1	32	144	-77,7
Área A7	25,6	25	67	-62,6

Fonte: o autor.

Para o fósforo, o sensor demonstrou capacidade de aproximação com os valores reais em alguns cenários. Conforme a Tabela 13, o equipamento registrou erros relativos satisfatórios, atingindo 7,14% na Área A7 e 16,6% na Área P4.

O fator crítico, no entanto, é a coluna da umidade. O sensor só atinge essa margem de acerto em níveis específicos de umidade para cada amostra, como os 24,6% exigidos na Área P3 ou os 8,3% na Área A7. Esse comportamento é consistente com os resultados da ANCOVA, que indicaram paralelismo entre as curvas. Como a resposta do sensor à água é uniforme entre os solos, apresentando retas paralelas, ele naturalmente exigiu mais umidade na Área P3 para alcançar um valor real maior, de 30 mg/kg, e menos umidade na Área A7 para alcançar um valor real menor, de 14 mg/kg. Isso comprova que o sensor NPK é, na prática, altamente dependente da condutividade elétrica do meio. Para o fósforo, o hardware funciona, mas é necessário embarcar uma equação matemática no microcontrolador que corrija a leitura do P com base na umidade atual lida no momento do envio.

Para o potássio, a análise dos erros relativos apresentados nas tabelas confirma que o comportamento físico do sensor na matriz de solo reflete diretamente as anomalias já detectadas

nos testes com solução aquosa. Isto é, os dados do potássio evidenciam uma limitação crônica do hardware que independe do meio físico analisado. Ao comparar os testes em solução aquosa apresentados na Tabela 6, com as análises de solo da Tabela 14, nota-se que os níveis de erro relativo se mantiveram praticamente no mesmo patamar. Durante os ensaios na solução de KCl, o sensor subestimou as concentrações mais altas, apresentando erros entre -50% e -61% para valores reais de 50 a 200 mg/L. Na matriz sólida, esse exato comportamento de saturação precoce se repetiu. Na amostra da Área A5, onde a concentração real era de 144 mg/kg, o limite detectado foi de apenas 32 mg/kg, apresentando um erro de -77,7%, o que corrobora a saturação já vista na solução aquosa de 200 mg/L. Nas demais áreas, os erros variaram de -31,5% a -62,6%, acompanhando a tendência de subestimação estabelecida nos testes com líquidos.

Esse padrão comprova que a subestimação do potássio não é um fenômeno causado pela complexidade do solo, mas sim uma limitação de projeto do próprio sensor, que possui baixa sensibilidade aos íons K^+ e atinge seu teto de leitura muito cedo, tornando-se ineficaz para quantificar o nutriente em solos de média e alta fertilidade.

Assim, como conclusão prática do sensor NPK analisado, os resultados sugerem que pode ser utilizado um modelo matemático global de compensação para o fósforo. Por outro lado, para o potássio, devido à maior dispersão observada nas inclinações e à forte saturação do hardware, recomenda-se uma avaliação adicional com um número maior de amostras para o aumento do poder estatístico. Tais evidências experimentais ratificam as premissas teóricas discutidas nesta pesquisa, demonstrando que o comportamento do hardware em campo é condizente com as limitações físicas e químicas descritas na literatura. É importante ressaltar que essas conclusões se restringem estritamente aos solos analisados neste estudo; a aplicação do sistema IoT em tipos de solo com matrizes e texturas distintas exigirá novas análises de calibração para garantir a confiabilidade dos dados.

4.4 Comparativo de custos entre o sistema IoT x análise laboratorial

Para avaliar a viabilidade da solução, comparou-se o custo de implementação do hardware IoT com os custos da análise química tradicional de solo.

O sistema exige um investimento inicial em hardware de R\$ 473,00 (92). Esse valor engloba duas placas Heltec ESP32 LoRa v2, R\$ 189,00 cada, operando como nó sensor e receptor e um sensor NPK RS485 com valor de R\$ 82,00 (79), além de um módulo RS485 de R\$13,00 (82). A principal vantagem deste custo fixo é viabilizar o monitoramento do solo de forma contínua e em tempo real.

Em contrapartida, a análise laboratorial completa, com análise de macronutrientes, micronutrientes e granulometria, possui um custo médio de R\$ 110,00 por amostra, com latência de 7 dias úteis para a entrega do laudo. Além do custo financeiro, há também o custo logístico. Em terrenos planos, utiliza-se de 5 a 6 pontos de coleta (0 a 20 cm de profundidade) para formar uma amostra por hectare. Em relevos com desnível, é necessário dividir a área em cotas alta e baixa, exigindo a coleta e o pagamento de duas amostras distintas.

O custo total de aquisição do nó sensor IoT equivale a aproximadamente quatro amostras de laboratório. Embora a análise laboratorial seja indispensável para a correção de base inicial do solo devido à sua alta exatidão, a sua latência de 7 dias inviabiliza intervenções rápidas. O sistema LoRa atua como uma ferramenta complementar viável, justificando seu investimento ao entregar a dinâmica temporal e imediata que o laudo tradicional não consegue oferecer.

Apesar das limitações de acurácia identificadas no sensor NPK, os ensaios demonstram que a infraestrutura IoT desenvolvida operou conforme os requisitos de projeto. A instabilidade nas leituras químicas não invalida a arquitetura de comunicação e processamento de dados, uma vez que o sistema teve êxito nas etapas de telemetria, armazenamento e visualização remota. Assim, o hardware proposto consolida-se como uma plataforma de conectividade robusta, cuja eficácia é independente do desempenho específico do sensor periférico utilizado.

5 Conclusão e trabalhos futuros

5.1 Conclusão

O desenvolvimento e a validação deste sistema IoT permitiram extrair conclusões sobre a integração de tecnologias de monitoramento e o comportamento de sensores comerciais de baixo custo.

No âmbito das telecomunicações, a tecnologia LoRa demonstrou ser altamente viável e vantajosa para a aplicação proposta. O padrão destacou-se pela facilidade e pelo baixo custo de implementação de uma rede privada, garantindo total autonomia sobre a infraestrutura. Além disso, a tecnologia entregou um excelente compromisso entre o longo alcance de transmissão e uma taxa de dados perfeitamente adequada para o tráfego regular dos pacotes de telemetria no campo.

Em relação ao sistema IoT como um todo, conclui-se que a arquitetura operou com êxito, cumprindo integralmente sua finalidade técnica de telemetria, processamento e visualização de dados. A plataforma possui alto potencial como ferramenta de suporte à tomada de decisão ágil e em tempo real. Embora o hardware desenvolvido não substitua a precisão absoluta de uma análise laboratorial para a correção de base do solo, ele preenche a lacuna da dinâmica temporal, entregando um panorama imediato da área monitorada. Portanto, o sucesso da infraestrutura de comunicação e do ecossistema de software independe das limitações de acurácia do sensor utilizado.

Por fim, a análise do sensor NPK 6 em 1 revelou características intrínsecas ao seu projeto eletrônico. O hardware apresentou alta repetibilidade, garantindo leituras estáveis nas mesmas condições de ensaio. Contudo, o sensor não se mostrou confiável para medições absolutas e isoladas de macronutrientes, uma vez que sua resposta é estritamente dependente da variação de umidade e da condutividade elétrica do solo. Essa característica gera leituras mascaradas e saturação precoce, especialmente para o potássio. Para sua utilização comercial, torna-se imprescindível o embarque de modelos matemáticos de compensação algorítmica para tentar contornar essas limitações de hardware.

5.2 Trabalhos futuros

As limitações identificadas e o potencial da arquitetura desenvolvida abrem diversas frentes para a continuidade da pesquisa. Inicialmente, propõe-se a realização de uma engenharia reversa do sensor NPK para mapear detalhadamente o seu funcionamento e entender as falhas do transdutor. A partir desse estudo, seria possível projetar um sensor proprietário do zero ou, alternativamente, substituir o módulo atual por uma arquitetura IoT baseada em Sensores Íon-Seletivos (ISE) dedicados e isolados para o fósforo e o potássio, visando eliminar a dependência crítica da umidade e a saturação em altas concentrações.

No âmbito das telecomunicações, sugere-se a realização de um estudo empírico de propagação de radiofrequência na área agrícola, gerando mapas de cobertura a partir do reposicionamento estratégico do gateway LoRa. Esse estudo de campo permitiria avaliar o impacto prático de diferentes parâmetros de modulação, como o spreading factor e a largura de banda, sobre o alcance máximo e a taxa de entrega de pacotes. Por fim, recomenda-se a evolução da topologia de rede atual para uma arquitetura mesh sem fio. Utilizando os próprios nós sensores baseados no módulo Heltec ESP32 LoRa como repetidores, seria viável expandir

significativamente a malha de monitoramento pela fazenda sem a necessidade de adquirir múltiplos gateways de alto custo.

Referências

1. BOARETTO, Antonio Enedi. A evolução da população mundial, da oferta de alimentos e das ciências agrárias. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 513-526, 2009.
2. CASTANHO, Roberto Barboza; TEIXEIRA, Matheus Eduardo Souza. A evolução da agricultura no mundo: da gênese até os dias atuais. **Brazilian Geographical Journal**, Ituiutaba, v. 8, n. 1, p. 136-146, 2 Outubro 2019.
3. CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA, ESALQ/USP). **PIB DO AGRONEGÓCIO FECHA 2023 COM QUEDA DE 2,99%**. Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA). Brasília. 2024.
4. ESTADÃO CONTEÚDO. Agronegócio no Brasil dá salto em 20 anos e hoje equivale ao PIB da Argentina. **InfoMoney**, 2023. Disponível em: <<https://www.infomoney.com.br/negocios/agronegocio-no-brasil-da-salto-em-20-anos-e-hoje-equivale-ao-pib-da-argentina/>>. Acesso em: 7 Agosto 2024.
5. SCHNEIDER, Keith. ‘It’s getting worse’ – U.S. failing to stem tide of harmful farm pollutants. **Iowa Capital Dispatch**, 2024. Disponível em: <<https://iowacapitaldispatch.com/2024/04/21/its-getting-worse-u-s-failing-to-stem-tide-of-harmful-farm-pollutants/>>. Acesso em: 7 Agosto 2024.
6. HEIM, Madeline. Not just a Gulf problem: Mississippi River farm runoff pollutes upstream waters. **Investigate Midwest**, 2024. Disponível em: <<https://investigatemidwest.org/2024/06/19/not-just-a-gulf-problem-mississippi-river-farm-runoff-pollutes-upstream-waters/>>. Acesso em: 7 Agosto 2024.
7. WARD, Mary H. et al. Drinking Water Nitrate and Human Health: An Updated Review. **International Journal of Environmental Resaerch and Public Health**, 23 Julho 2018.
8. JESSMER, Douglas E. Zona morta no Golfo do México cresce além da média. **Revista Cultivar**, 2024. Disponível em: <<https://revistacultivar.com.br/noticias/zona-morta-no-golfo-do-mexico-cresce-alem-da-media#:~:text=A%20zona%20morta%20do%20Golfo,%C3%A1gua%2C%20prejudica%20a%20vida%20marinha>>. Acesso em: 8 Agosto 2024.
9. KUYEK, Devlin; HOBELINK, Henk. Las Exxons de la agricultura. **GRAIN**, 2015. Disponível em: <<https://grain.org/article/entries/5276-las-exxons-de-la-agricultura>>. Acesso em: 8 Agosto 2024.

10. BORTOLI, Marcelo et al. Emissão de óxido nitroso nos processos de remoção biológica de nitrogênio de efluentes. **SciELO Brasil, Engenharia Sanitária e Ambiental** , Março 2012. 1-6.
11. TOTVS. Agricultura 4.0: Conceito, tecnologias, vantagens e desafios. **TOTVS**, 2024. Disponível em: <<https://www.totvs.com/blog/gestao-agricola/agricultura-4-0/>>. Acesso em: 4 Outubro 2024.
12. LANE, Ingrid. Benefícios e desafios do Avanço da Agricultura 4.0 à produção agrícola. **Blog Verde**. Disponível em: <<https://blog.verde.ag/pt/consultores-do-agro/beneficios-e-desafios-do-avanco-da-agricultura-4-0-a-producao-agricola/>>. Acesso em: 20 Agosto 2024.
13. GOUMOPOULOS, Christos; O'FLYNN, Brendan; KAMEAS, Achilles. Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 105, p. 20-33, 2014. ISSN 0168-1699.
14. UDDIN, Amã et al. **Agriculture internet of things: AG-IoT**. 2017 27th International Telecommunication Networks and Applications Conference (ITNAC). [S.l.]: IEEE. 2017. p. 1-6.
15. WORTMAN, S.E. Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and. **Scientia Horticulturae**, Amsterdam, 2015. 34-42.
16. KIM, Y.; EVANS, RG; IVERSEN, WM. Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network, v. 57, p. 1379-1387, Julho 2008.
17. ATMADJA, Wiedjaja et al. **Hydroponic system design with real time OS based on ARM Cortex-M microcontroller**. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. [S.l.]: IOP Publishing Ltd. 2018.
18. MONTOYA, A P et al. **Automatic aeroponic irrigation system based on Arduino's platform**. 5th Colombian Conference of Engineering Physics (V CNIF). Medellin: Journal of Physics: Conference Series. 2017.
19. BARBOSA, Guilherme Lages et al. Comparison of Land, Water, and Energy Requirements of Lettuce Grown Using Hydroponic vs. Conventional Agricultural Methods. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, 16 Junho 2016. 6879–6891.

20. ISMAIL, Muhammad Ikhwan Hanif bin; THAMRIN, Norashikin M. **IoT implementation for indoor vertical farming watering system**. 2017 International Conference on Electrical, Electronics and System Engineering (ICEESE). [S.l.]: IEEE. 2017. p. 89-94.
21. GÓMEZ-CHABLA, R. et al. **IoT Applications in Agriculture: A Systematic Literature Review**. ICT for Agriculture and Environment. [S.l.]: CITAMA2019. 2019. p. 68-76.
22. SALATI, Paula. Embrapa foca em tecnologias para pequeno produtor, mas inovação não chega por falta de assistência, diz presidente. **G1**, 2023. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/agronegocios/noticia/2023/08/12/embrapa-foca-em-tecnologias-para-pequeno-produtor-mas-inovacao-nao-chega-por-falta-de-assistencia-diz-presidente.ghtml>>. Acesso em: 20 ago. 2024.
23. ZANUTO, Arthur Henrique Silva. **Agricultura 4.0: desafios e impactos das novas tecnologias na agricultura brasileira**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 40. 2024.
24. ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A Survey. **Computer Networks**, v. 54(15), p. 2787-2805, 2010.
25. GUBBI, Jayavardhana et al. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, v. 29, n. 7, p. 1645-1660, 2013.
26. AL-FUQAHA, A. et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications, v. 17, p. 2347-2376, 2015.
27. SETHI, Pallavi; SARANGI, Smruti R. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications. **Journal of Electrical and Computer Engineering**, p. 25, Janeiro 2017.
28. 1NCE. Hardware de IoT e seu lugar no ecossistema de IoT. **1NCE**. Disponível em: <<https://1nce.com/pt-br/recursos/news/blog/iot-hardware-e-ecossistema#:~:text=O%20hardware%20de%20IoT%20envolve,sejam%20processados%20e%20analizados%20adequadamente.>>. Acesso em: 4 Outubro 2024.
29. POPLI, Sakshi; JHA, Rakesh Kumar; JAIN, Sanjeev. A Survey on Energy Efficient Narrowband Internet of Things (NB-IoT): Architecture, Application and Challenges. **IEEE Access**, v. 7, p. 16739 - 16776, 2019.
30. ANTONY, Anish Paul et al. A Review of Practice and Implementation of the Internet of Things (IoT) for Smallholder Agriculture. **Sustainability** **2020**, 6 Maio 2020.

31. SHAHZAD, Khurram; OELMANN, Bengt. **A comparative study of in-sensor processing vs. raw data transmission using ZigBee, BLE and Wi-Fi for data intensive monitoring applications**. 2014 11th International Symposium on Wireless Communications Systems (ISWCS). Barcelona: IEEE. 2014. p. 519-524.
32. ALICE, Akemi; FERNANDES, Arthur. Wi-Fi: explorando padrões, canais, diferenças e práticas de segurança. **Alura**, 2023. Disponível em: <[- 33. INTEL. 2,4 GHz, 5 GHz, 6 GHz: qual é a diferença? **Intel**. Disponível em: <\[- 34. HEYDON, Robin. **Bluetooth Low Energy The Developer's Handbook**. 37785. ed. \\[S.l.\\]: Pearson, 2012.
- 35. CSA. Zigbee Perguntas frequentes. **Connectivity Standards Alliance**. Disponível em: <\\[- 36. SHUAIB, Khaled et al. Performance Evaluation of IEEE 802.15.4: Experimental and Simulation Results. **Journal of Communications**, Junho 2007. 29-37.
- 37. DANBATT, Salim Jibrin; VAROL, Asaf. **Comparison of Zigbee, Z-Wave, Wi-Fi, and Bluetooth Wireless Technologies Used in Home Automation**. 2019 7th International Symposium on Digital Forensics and Security \\\(ISDFS\\\). Barcelos: IEEE. 2019. p. 1-5.
- 38. ZWAVE ALLIANCE. What is Z-Wave Long Range and How Does it Differ from Z-Wave? **ZWAVE ALLIANCE**. Disponível em: <\\\[- 39. DATATEM. Lora ou Sigfox? Escolha a melhor solução de M2M para seu negócio. **DATATEM**, 2021. Disponível em: <\\\]\\\(https://z-wavealliance.org/what-is-z-wave-long-range-how-does-it-differ-from-z-wave/>\\\)\\]\\(https://csa-iot.org/pt/todas-as-solu%C3%A7%C3%B5es/zigbee/perguntas-frequentes-sobre-zigbee/>\\)\]\(https://www.intel.com.br/content/www/br/pt/products/docs/wireless/2-4-vs-5ghz.html#:~:text=A%20banda%20de%202%2C4,para%20um%20melhor%20desempenho%20geral.>\)](https://www.alura.com.br/artigos/entendendo-os-padroes-de-wi-fi#:~:text=H%C3%A1%20diferentes%20padr%C3%B5es%20de%20rede,a%206%20GHz%20e%20al%C3%A9m.)>)

40. ALMEIDA, Orlan. Sigfox X LoRa: Qual a tecnologia ideal para a sua aplicação? **ConnectFive**. Disponível em: <<https://connectfive.com.br/sigfox-x-lora-qual-a-tecnologia-ideal-para-a-sua-aplicacao/>>. Acesso em: 20 Janeiro 2025.
41. ISLAM, Mahbubul et al. Future Industrial Applications: Exploring LPWAN-Driven IoT Protocols. **Sensors**, v. 24, n. 8, Abril 2024.
42. SIGFOX. Regulatory certification (type approval) FAQ. **SigFox Support**. Disponível em: <[https://support.sigfox.com/docs/regulatory-certification-type-approval-faq#Regulatorycertification\(typeapproval\)FAQ-WhichCEmodulationdoSigfoxdevicesuse](https://support.sigfox.com/docs/regulatory-certification-type-approval-faq#Regulatorycertification(typeapproval)FAQ-WhichCEmodulationdoSigfoxdevicesuse)>. Acesso em: 20 Janeiro 2025.
43. SIGFOX BUILD. PayLoad. **SigFox Build**. Disponível em: <<https://build.sigfox.com/payload>>. Acesso em: 20 Janeiro 2025.
44. SIGFOX SUPPORT. Sigfox Service map. **SigFox Support**. Disponível em: <<https://support.sigfox.com/docs/sigfox-service-map>>. Acesso em: 20 Janeiro 2025.
45. JABBAR, Waheb A. et al. LoRaWAN-Based IoT System Implementation for Long-Range Outdoor Air Quality Monitoring. **Internet of Things**, v. 19, Agosto 2022.
46. LORAWAN. What are LoRa and LoRaWAN? **LoRaWAN**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>>. Acesso em: 20 Janeiro 2025.
47. DEVALAL, Shilpa; KARTHIKEYAN, A. **LoRa Technology - An Overview**. 2018 Second International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA). Coimbatore: IEEE. 2018. p. 284-290.
48. THE THINGS NETWORK. Frequency Plans by Country. **The Things Network**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/frequencies-by-country/>>. Acesso em: 20 Janeiro 2025.
49. XHONNEUX, M. et al. A Low-Complexity LoRa Synchronization Algorithm Robust to Sampling Time Offsets. **IEEE Internet of Things Journal**, v. 9, n. 5, p. 3756-3769, Março 2022.
50. JOACHIM, Tapparel. **Complete Reverse Engineering of LoRa PHY**. École polytechnique fédérale de Lausanne. Lausanne.
51. SEMTECH. LoRa® and LoRaWAN®. **AN1200.86**, 2024. Disponível em: <<https://www.semtech.com/uploads/technology/LoRa/lora-and-lorawan.pdf>>. Acesso em: 06 fev. 2026.

52. ELSHABRAWY, T.; ROBERT, J. Analysis of BER and Coverage Performance of LoRa Modulation under Same Spreading Factor Interference. **2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)**, Bologna, 2018. 1-6.
53. SELLER, Olivier B.A.; NICOLAS SORNIN. Low Power Longrange Transmitter. **US 2014/0219329 A1**, 2014. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US20140219329A1/en>>. Acesso em: 06 Fevereiro 2026.
54. AUGUSTIN, A. et al. A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things. **Sensors** **2016**, v. 16.
55. TAPPAREL, J. et al. An Open-Source LoRa Physical Layer Prototype on GNU Radio. **2020 IEEE 21st International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)**, Atlanta, p. 1-5, 2020.
56. SILVA, Evalise Martins da. Agricultura 4.0: conceito, vantagens e como ela impacta a gestão agrícola. **aegro**, 2019. Disponível em: <<https://blog.aegro.com.br/agricultura-4-0/>>. Acesso em: 4 Outubro 2024.
57. FIELDVIEW. BLOG FieldView. **Entenda o que é a agricultura 4.0 e qual o seu impacto na gestão agrícola**, 2022. Disponível em: <<https://blog.climatefieldview.com.br/agricultura-4-0>>. Acesso em: 4 Outubro 2024.
58. CETESB. Definição. **CETESB**, 2025. Disponível em: <(https://cetesb.sp.gov.br/solo/#:~:text=O%20solo%20%C3%A9%20um%20meio,org%C3%A2nica%2C%20%C3%A1gua%20da%20zona%20n%C3%A3o>. Acesso em: 17 Janeiro 2025.
59. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. Soil fertility | Global Soil Partnership. **FAO**. Disponível em: <<https://www.fao.org/global-soil-partnership/areas-of-work/soil-fertility/en/>>. Acesso em: 17 Janeiro 2025.
60. POSTOLACHE, Stefan et al. IoT-Based Systems for Soil Nutrients Assessment in Horticulture. **Sensors**, Basel, 30 Dezembro 2022.
61. JAMES A. SILVA, R. S. U. (Ed.). **Plant Nutrient Management in Hawaii's Soils: Approaches for Tropical and Subtropical Agriculture**. Manoa: University of Hawaii at Manoa, College of Agriculture & Tropical Resources, 2014.

62. THINGUJAM, U., Prabha, D., Ghosh Bag, A. et al. From point sensing to intelligent systems: a comprehensive review on advanced sensor technologies for soil health monitoring. **Discover Sensors**, v. 1, p. 49, Dezembro 2025.
63. NADPOROZHSKAYA, M. et al. Recent Advances in Chemical Sensors for Soil Analysis: A Review. **Chemosensors**, v. 10, n. 1, p. 47, Janeiro 2022.
64. PAMUNGKAS, Wahyu et al. Research in Electronic Multi-Sensor Accuracy in the Implementation of Soil Fertility Monitoring System Using LoRA. **International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology**, v. 13, n. 6, p. 2397-2406, Dezembro 2023. Disponível em: <<https://ijaseit.insightsociety.org/index.php/ijaseit/article/view/18836>>. Acesso em: 17 Janeiro 2025.
65. YANG, Jian; SHARMA, Amit; KUMAR, Rajeev. IoT-Based Framework for Smart Agriculture. **International Journal of Agricultural and Environmental Information Systems (IJAIS)**, Janeiro 2021.
66. MADHUMATHI, R.; ARUMUGANATHAN, T.; SHRUTHI, R. **Soil NPK and Moisture analysis using Wireless Sensor Networks**. 2020 11th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT). Kharagpur: IEEE. 2020. p. 1-6.
67. N. N. C. OTHAMAN et al. IoT Based Soil Nutrient Sensing System for Agriculture Application. **International Journal of Nanoelectronics and Materials**, Perlis, v. 14, p. 279-288, Dezembro 2021.
68. PERDANA, Doan; KUSUMA, Wahyu Rizal Panca; ALINURSAFA, Ibnu. Developing of Automatic Fertilizer Control System in Soybean Plant Based on Internet of Things and LoRa Networks. **International Journal of Electronics and Telecommunications**, Varsóvia, v. 67, n. 4, p. 549-558, 2021.
69. PERDANA, Doan et al. Analysis of a Public and Private Networks for Nutrient Measurement System using LoRawan Network. **International Journal of Computers, Communications & Control**, v. 17, n. 3, Abril 2022.
70. PERDANA, Doan; PUTRA, Riyan; BISONO, Gustommy. Analysis of Soil Substance Measurement System Based on Internet of Things (IoT) with Star Topology Network. **International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology**, v. 20, n. 6, p. 13-18, Dezembro 2019.

71. GARCÍA, Laura et al. **WiFi and LoRa Energy Consumption Comparison in IoT ESP 32/ SX1278 Devices**. SMART 2019 : The Eighth International Conference on Smart Cities, Systems, Devices and Technologies. Nice: HAL. 2019. p. 26-31.
72. MAROUA, Benlahsiniya; RACHIDA, Ait Abdelouahid; ABDELAZIZ, Marzak. Smart farming architectures based on IoT review: comparative study. **Procedia Computer Science**, v. 203, p. 783-788, Agosto 2022.
73. BHATIA, Sandeep; JAFFERY, Zainul Abdin; MEHFUZ, Shabana. **A Comparative Study of Wireless Communication Protocols for use in Smart Farming Framework Development (ICCT)**. 2023 3rd International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques. Jaipur: IEEE. 2023.
74. SINHA, Rashmi Sharan; HWANG, Seung-Hoon. A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT. **ICT Express**, v. 3, n. 1, p. 14-21, Março 2017.
75. KHANNA, Abhishek; KAUR, Sanmeet. Evolution of Internet of Things (IoT) and its significant impact in the field of Precision Agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, Patiala, v. 157, p. 218-231, Fevereiro 2019.
76. SANTOS, Uélison Jean L. dos et al. AgriPrediction: A proactive internet of things model to anticipate problems and improve production in agricultural crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 161, p. 202-213, Junho 2019.
77. FAROOQ, Muhammad Shoaib et al. Role of IoT Technology in Agriculture: A Systematic Literature Review. **Electronics** **2020**, 12 Fevereiro 2020.
78. JIANG, Xiaofan et al. Hybrid Low-Power Wide-Area Mesh Network for IoT Applications. **IEEE Internet of Things Journal**, 14 Junho 2020. 901-915.
79. ALIEXPRESS. Sensor de solo RS485 Modbus 7 em 1 mede umidade do solo, temperatura, umidade, EC PH NPK. **AliExpress**, 2025. Disponível em: <<https://pt.aliexpress.com/item/1005005697940574.html>>. Acesso em: 19 Setembro 2025.
80. LAST MINUTE ENGINEERS. Interligando o sensor NPK do solo com o Arduino. **Last Minute Engineers**. Disponível em: <<https://lastminuteengineers.com/soil-npk-sensor-arduino-tutorial/>>. Acesso em: 12 Janeiro 2026.
81. COMWINTOP. Sensors-CWT CO., LIMITED - ComWinTop. **ComWinTop**, 2025. Disponível em: <[https://www.bing.com/search?q=CWT+Soil+sensor+\(NPK+type\)+manual+ComWin](https://www.bing.com/search?q=CWT+Soil+sensor+(NPK+type)+manual+ComWin)>

- Top&cvid=bc2dd4d04642434ea1833b6bec53799f&gs_lcrp=EgRlZGdlKgYIABBF GD kyBggAEEUYOTIICAEQ6QcY_FXSAQg1MTQxajBqNKgCALACAQ&FORM=AN AB01&PC=U531>. Acesso em: 12 Fevereiro 2025.
82. MARKER HERO. Módulo Conversor RS485 para Arduino. **Marker Hero**. Disponível em: <<https://www.markerhero.com/produto/modulo-conversor-rs485-para-arduino/>>. Acesso em: 12 Janeiro 2026.
83. GUSE, Rosana. O que é RS-485? **MarkerHero**, 2024. Disponível em: <https://www.markerhero.com/blog/o-que-e-rs-485/#:~:text=Diferente%20do%20padr%C3%A3o%20RS%2D232%2C%20que%20%C3%A9%20mais,mais%2C%20dependendo%20das%20condi%C3%A7%C3%B5es%20espec%C3%ADficas%20de%20implementa%C3%A7%C3%A3o.>)>. Acesso em: 06 Janeiro 2026.
84. RIBEIRO, Andre Louis Souza. Entendendo o Firebase e suas principais funcionalidades. **Alura**, 2023. Acesso em: 06 <https://www.alura.com.br/artigos/entendendo-firebase-principais-funcionalidades> Janeiro 2026.
85. BACK4APP. Bancos de dados do Firebase | Qual é a melhor opção para seu aplicativo? **back4app**. Disponível em: <<https://blog.back4app.com/pt/bancos-de-dados-do-firebase-qual-e-a-melhor-opcao-para-seu-aplicativo/>>. Acesso em: 06 Janeiro 2026.
86. HELTEC AUTOMATION. Heltec Automation. **WiFi LoRa 32(V2), ESP32 + SX1262 LoRa Node, Meshtastic and LoRaWAN compatible — Phaseout**. Disponível em: <<https://heltec.org/project/wifi-lora-32v2/>>. Acesso em: 12 Fevereiro 2026.
87. EASYEDA. Easy-to-use & Free PCB Design Software. **EasyEDA**, 2026. Disponível em: <<https://www.easyeda.com/>>. Acesso em: 25 Janeiro 2026.
88. MIT APP INVENTOR. Create Apps! **MIT App Inventor**, 2026. Disponível em: <<https://appinventor.mit.edu/>>. Acesso em: 19 Fevereiro 2026.
89. AUTODESK. Autodesk Tinkercad. **Tinkercad**, 2026. Disponível em: <<https://www.tinkercad.com/>>. Acesso em: 1 Março 2026.
90. WEIL, Raymond R.; BRADY, Nyle C. **The Nature and Properties of Soils**. 15^a. ed. [S.l.]: Pearson Education, 2017.
91. WILKE, BM. Determination of Chemical and Physical Soil Properties. **Monitoring and Assessing Soil Bioremediation**, Berlin, v. 5, 2005.

92. CURTO CIRCUITO. Placa WiFi LoRa 32 V2. **Curto circuito**. Disponível em: <<https://curtocircuito.com.br/placa-wifi-lora-32-v2.html>>. Acesso em: 25 Fevereiro 2026.
93. GOMES, Liz Lopes Almeida; CAMEIRA, Renato Flório. **Internet of Things: Conceitos e Aplicações Baseadas em uma Revisão Bibliográfica**. Anais do XXXVIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - Enegep. Maceió: [s.n.]. 2018.
94. EQUIPE TOTVS. Entenda o que é a agricultura digital e seu contexto. **TOTVS**, 2024. Disponível em: <<https://www.totvs.com/blog/gestao-agricola/agricultura-digital/>>. Acesso em: 20 Agosto 2024.
95. ORACLE. O que é IoT? **Oracle**. Disponível em: <<https://www.oracle.com/br/internet-of-things/>>. Acesso em: 4 Outubro 2024.
96. SOARES, Wagner. IoT: Definição e Importância da Internet das coisas. **SQUAIR**, 2024. Disponível em: <<https://blog.squair.io/pt/iot-defini%C3%A7%C3%A3o-e-import%C3%A2ncia-da-internet-das-coisas>>. Acesso em: 4 Outubro 2024.
97. SAP. O que é IoT e como funciona? **SAP**. Disponível em: <[https://www.sap.com/brazil/products/artificial-intelligence/what-is-iot.html#:~:text=A%20Internet%20das%20Coisas%20\(IoT,%C3%A9%20sin%C3%B4nimo%20da%20Ind%C3%BAstria%204.0](https://www.sap.com/brazil/products/artificial-intelligence/what-is-iot.html#:~:text=A%20Internet%20das%20Coisas%20(IoT,%C3%A9%20sin%C3%B4nimo%20da%20Ind%C3%BAstria%204.0)>. Acesso em: 4 Outubro 2024.
98. CLOUDFLARE. O que é um protocolo? | Definição de protocolo de rede. **CloudFlare**. Disponível em: <<https://www.cloudflare.com/pt-br/learning/network-layer/what-is-a-protocol/#:~:text=Na%20rede%2C%20um%20protocolo%20%C3%A9,comunique%20uns%20com%20os%20outros.>>. Acesso em: 3 Janeiro 2025.
99. THE THINGS NETWORK. What are LoRa and LoRaWAN? **The Things Network**. Disponível em: <<https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/what-is-lorawan/>>. Acesso em: 20 Janeiro 2025.
100. USINAINFO. Sensor NPK, PH, Condutividade, Temperatura e Umidade do Solo NPKPHCTH-S 7 em 1 RS485. **Usinainfo**. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-solo/sensor-npk-ph-condutividade-temperatura-e-umidade-do-solo-npkphcth-s-rs485-8611.html>>. Acesso em: 18 ago. 2024.
101. ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, v. 54, n. 15, p. 2787-2805, Outubro 2010.

ANEXO A: Tabelas dos experimentos realizados

Tabela 15 – Dados da análise da solução aquosa de fósforo.

Amostra (mg/ml)	Medição	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Média	Desvio Padrão
0	1	0	0	0	0	0,0
	2	0	0	0		
	3	0	0	0		
	4	0	0	0		
	5	0	0	0		
10	1	0	26	18	18	0,0
	2	0	26	18		
	3	0	26	18		
	4	0	26	18		
	5	0	26	18		
25	1	0	34	26	26	0,0
	2	0	34	26		
	3	0	34	26		
	4	0	34	26		
	5	0	34	26		
50	1	1	49	42	42	0,0
	2	1	49	42		
	3	1	49	42		
	4	1	49	42		
	5	1	49	42		
100	1	20	93	85	87	±1,2
	2	21	95	87		
	3	21	95	87		
	4	21	95	88		
	5	21	95	88		
200	1	68	204	198	198	0,0
	2	68	204	198		
	3	68	204	198		
	4	68	204	198		
	1	68	204	198		

Fonte: o autor.

Tabela 16 – Dados da análise da solução aquosa de potássio.

Amostra (mg/ml)	pH do pHmetro	Medição	Nitrogênio	Fósforo	Potássio	Média	Desvio Padrão
10	7,06	1	0	18	11	11	0
		2	0	18	11		
		3	0	18	11		
		4	0	18	11		
		5	0	18	11		
25	7,06	1	0	22	14	14	0
		2	0	22	14		
		3	0	22	14		
		4	0	22	14		
		5	0	22	14		
50	7,03	1	0	31	23	23	0
		2	0	31	23		
		3	0	31	23		
		4	0	31	23		
		5	0	31	23		
100	7,06	1	0	47	40	40	0
		2	0	47	40		
		3	0	47	40		
		4	0	47	40		
		5	0	47	40		
200	7,06	1	19	90	83	83	0
		2	19	90	83		
		3	19	91	83		
		4	19	91	83		
		5	19	90	83		

Fonte: o autor.

ANEXO B: Declaração sobre o uso de Inteligência Artificial



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações - Patos de Minas



ANEXO I - Declaração sobre o Uso de Inteligência Artificial

Aluno (a): Gabriel Parducci Martinelli
Matrícula: 42011ETE010
Título PFCII: SISTEMA INTELIGENTE PARA MONITORAMENTO DE FERTILIDADE DO SOLO EM TEMPO REAL

Eu, aluno(a) com nome e matrícula supracitados, e com o respectivo trabalho de PFCII, declaro para os devidos fins que as informações prestadas a seguir refletem de forma verídica e completa o uso ou não uso de ferramentas de Inteligência Artificial neste trabalho, em conformidade com a Resolução COLCGETPM Nº 19, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2025.

SELECIONE UMA DAS OPÇÕES A SEGUIR:
☐ NÃO HOUE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (Se marcar esta opção, não é necessário preencher os campos 1 a 4) Declaro que não utilizei, em nenhuma etapa do desenvolvimento do presente trabalho, ferramentas de Inteligência Artificial para qualquer finalidade e assumo integral responsabilidade pelo conteúdo.
☒ HOUE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (Preencher os campos obrigatórios abaixo, assinalando obrigatoriamente os itens 3 e 4) Declaro que utilizei, durante o desenvolvimento do presente trabalho, as seguintes ferramentas de Inteligência Artificial e informações descritas nos itens de 1 a 4.

1. Ferramenta(s) e versão(ões) predominante(s): Gemini PRO

2. Propósito(s) (marque todos os que se aplicam):

- ☒ Exploração inicial de ideias.
- ☒ Busca de referências bibliográficas.
- ☒ Revisão de linguagem (por exemplo, melhoria de gramática ou correção de ortografia).
- ☐ Tradução técnica (conversão do texto ou partes dele para outro idioma).
- ☐ Geração automatizada de tabelas, gráficos ou figuras a partir de dados previamente analisados pelos autores.
- ☒ Programação: sugestão, depuração e documentação de códigos computacionais.

☐ Outros (especificar):



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações - Patos de Minas



3. Autoria e validação humana:

☒ Informo que a autoria intelectual do manuscrito, bem como sua supervisão e validação, são de minha responsabilidade e que o uso de ferramentas de IA foi exclusivamente para os propósitos acima declarados.

4. Princípios éticos:

☒ Declaro que a utilização das ferramentas de IA seguiu práticas éticas, não incluindo atividades que comprometam a integridade científica tais como a geração de conteúdo original, manipulação de dados, plágio, interpretações ou análises pela IA.

☒ Declaro que respeitei direitos autorais, licenças, confidencialidade e políticas editoriais.

☒ Declaro que não enviei dados inéditos ou sensíveis a serviços que utilizam conteúdos para treinamento de modelos, exceto em plataformas institucionais ou com garantias contratuais de confidencialidade e não retenção, assegurando conformidade com a LGPD (Lei nº 13.709/2018) e demais normas de proteção de dados.

Data: 10/03/2026

Documento assinado digitalmente
GABRIEL PARDUCCI MARTINELLI
Data: 11/03/2026 09:03:36-0300
Verifique em <https://validar.ti.gov.br>

Assinatura do(a) Discente