

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE - MESTRADO PROFISSIONAL
CAMPUS RIO VERDE

SOLUÇÃO IoT PARA MONITORAMENTO E CONTROLE
DE PARÂMETROS AMBIENTAIS DO CULTIVO
SUSTENTÁVEL EM RESIDÊNCIAS

Autor: José Francisco Resende Salgado

Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

Coorientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior

RIO VERDE - GO

junho - 2025

JOSÉ FRANCISCO RESENDE SALGADO

**SOLUÇÃO DE IoT PARA O MONITORAMENTO E
CONTROLE DE PARÂMETROS AMBIENTAIS DO
CULTIVO SUSTENTÁVEL EM RESIDÊNCIAS**

Dissertação apresentada à banca examinadora como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE em ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde – Linha de Pesquisa II – Gestão e Tecnologias Ambientais

Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira

Coorientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior

RIO VERDE, GO

junho – 2025

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E
SUSTENTABILIDADE - MESTRADO PROFISSIONAL
CAMPUS RIO VERDE

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S164	SALGADO, José Francisco Resende SOLUÇÃO IoT PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DE PARÂMETROS AMBIENTAIS DO CULTIVO SUSTENTÁVEL EM RESIDÊNCIAS / José Francisco Resende SALGADO. Rio Verde - GO 2025. 104f. il. Orientador: Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira. Coorientador: Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior. Dissertação (Mestre) - Instituto Federal Goiano, curso de 0233144 - Mestrado Profissional em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (Campus Rio Verde). 1. Internet da Coisas. 2. Agricultura de Precisão. 3. Cultivo em Residências. 4. Agricultura Urbana. 5. Automação. I. Título.
------	--

AMPUS RIO VERDE



Repositório Institucional do IF Goiano - RIIIF Goiano
Sistema Integrado de Bibliotecas

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)
 Artigo científico
 Dissertação (mestrado)
 Capítulo de livro
 Monografia (especialização)
 Livro
 TCC (graduação)
 Trabalho apresentado em evento
 Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor: José Francisco Resende Salgado
 Matrícula: 2023102331440003

Título do trabalho:
SOLUÇÃO IoT PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DE PARÂMETROS AMBIENTAIS DO CULTIVO SUSTENTÁVEL EM RESIDÊNCIAS

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIIF Goiano: 22 /08 /2025

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

RioVerde-GO 18 /08 /2025
Local Data

JOSE FRANCISCO
RESENDE
SALGADO62081810115

Assinado de forma digital por JOSE FRANCISCO RESENDE SALGADO62081810115
Data: 2023.08.18 15:25:44 -0300

Assinatura do titular dos direitos autorais

gov.br

GERALDO ANDRADE DE OLIVEIRA

Data: 15/08/2023 15:25:44-0300

Verifique em <https://validar.if.gov.br>

Cliente e de acordo:

Assinatura digital do titular dos direitos autorais



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
 MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
 SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
 INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 50/2025 – SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Unidade do IF Goiano:	Campus Rio Verde	
Programa de Pós-Graduação:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Defesa de:	Dissertação	Defesa de número: 91
Data: 26/06/2025	Hora de início: 14:00h	Hora de encerramento: 18:00h
Matrícula do discente:	2023102331440003	
Nome do discente:	José Francisco Resende Salgado	
Título do trabalho:	UTILIZAÇÃO DE UMA PLATAFORMA DE IOT PARA MONITORAR O CRESCIMENTO DE ALFACE EM RESIDÊNCIAS	
Orientador:	Geraldo Andrade de Oliveira	
Área de concentração:	Engenharia Aplicada e Sustentabilidade	
Linha de Pesquisa:	Gestão e tecnologias ambientais	
Projeto de pesquisa de vinculação	PROJETO DE MONITORAMENTO E CONTROLE DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS DE TEMPERATURA, HUMIDADE, PH, LUMINOSIDADE E CRESCIMENTO DE UM CULTIVO SUSTENTÁVEL DE ALFACE (LACTUCA SATIVA) EM RESIDÊNCIAS COM UMA PLATAFORMA IOT	

Titulação:	Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade
------------	--

Nocta data, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora, Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira (Presidente da banca), Prof. Dr. Fabiano Guimarães Silva (Avaliador Externo), Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Júnior (Avaliador Interno) e Prof. Dr. Gustavo Maia de Almeida (Avaliador Externo) sob a presidência do primeiro, em sessão pública realizada de forma online, para procederem a avaliação da defesa de dissertação, em nível de Mestrado, de autoria de **JOSÉ FRANCISCO RESENDE SALGADO**, discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Geraldo Andrade de Oliveira, que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida o(a) autor (a) da dissertação para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, e procedidas às correções recomendadas, a dissertação foi **APROVADA**, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE**. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGEAS da versão definitiva da dissertação, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de dissertação de mestrado, e foi lavrada a presente Ata. que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Decisão da banca: Aprovada

Esta defesa é parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna do IFGoiano.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Geraldo Andrade de Oliveira**, Geraldo Andrade de Oliveira - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Ifg (1), em 26/06/2025 16:52:05.
- **Fabiano Guimaraes Silva**, DIRETOR(A) GERAL - CD2 - CMPRV, em 26/06/2025 16:54:59.
- **Joao Areis Ferreira Barbosa Junior**, GERENTE - CD4 - GEXT-RV, em 26/06/2025 17:10:49.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 06/06/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 714455
Código de Autenticação: e637da9acc



Documento assinado digitalmente
 GUSTAVO MAIA DE ALMEIDA
 Data: 30/06/2025 12:17:35-0300
 Verifique em <https://validar.it.gov.br>

INSTITUTO FEDERAL GOIANO
 Campus Rio Verde
 Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970
 (64) 3624-1000

SOLUÇÃO DE IoT PARA MONITORAMENTO E CONTROLE DE PARÂMETROS AMBIENTAIS DO CULTIVO SUSTENTÁVEL EM RESIDÊNCIAS

Orientador: Dr. Geraldo Andrade de Oliveira
Coorientador: Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade -
Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade.

APROVADO em 26 de junho de 2025.
Sensor de Humidade e Temperatura

Prof. Dr. Geraldo Andrade de Oliveira
Presidente da Banca
IFES – Instituto Federal do Espírito Santos,
Campus Presidente Kennedy

Prof. Dr. Fabiano Guimaraes Silva
Avaliador Externo
IF Goiano Campus Rio Verde

Prof. Dr. João Areis Ferreira Barbosa Junior
Avaliador interno
IF Goiano - Rio Verde

Prof. Dr. Gustavo Maia de Almeida
Avaliador Externo
IFES – Instituto Federal do Espírito Santo, Campus
Serra

DEDICATÓRIA

Aos meus filhos, Gabriel, Maria Gabriela, Rafael, Maria Eduarda, Miguel, Maria Luiza, e em especial, a minha adorável esposa Jozélia.

Também dedico aos meus tios que de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui: Herbert Arrais, Cleide Maria, Conceição de Maria, Manoel Arrais, além de uma dedicação especial ao meu tio Rui Coelho de Resende. A minha eterna gratidão.

Por fim uma honrosa dedicação, in memoriam, para minha mãe Maria Luiza, minha querida mãe/avó Wandy Arrais e o saudoso avô Pedro Coelho

AGRADECIMENTOS

Com imensa gratidão, expresso meus sinceros agradecimentos a todos que, de alguma forma, contribuíram para a conclusão desta jornada acadêmica e pessoal.

Agradeço ao professor Doutor Geraldo Andrade de Oliveira, orientador nesta jornada, pelo apoio incondicional, pela sua dedicação e pelas orientações criteriosas que foram fundamentais para que eu ingressasse no mestrado profissional do Instituto Federal e que essa trajetória fosse possível até a conclusão dessa dissertação.

Aos professores Dr. Leonardo Garcia Marques e Dr. Jesmmer da Silveira Alves, pelas orientações ao longo desse período que foram contribuições essenciais que nortearam a superação de dúvidas e desafios, além de muito aprendizado.

Ao professor Dr. Ítalo Moraes Rocha Guedes, agrônomo e pesquisador da Embrapa Hortaliças no Distrito Federal, pelo seu acolhimento e apoio técnico em cultivo protegido de hortaliças que foram fundamentais para que eu conseguisse finalizar essa dissertação.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, agradeço a estrutura e recursos disponibilizados, fundamentais para a realização desse trabalho, e, em especial, ao coordenador do programa, professor Dr. Édio Damásio da Silva Junior.

Não poderia deixar de agradecer aos colegas discentes que fizeram parte dessa jornada, particularmente, ao meu compadre Leonardo Araújo, que me apresentou o IF Goiano.

Um agradecimento especial ao meu diretor Diego Henrique, que compreendeu o quão importante era essa etapa profissional em minha vida e autorizou, junto ao IF Goiano, minhas ausências do trabalho para que pudesse em momentos específicos dedicar-me as atividades do mestrado profissional, podendo repor essas ausências em outros horários,

BIOGRAFIA DO AUTOR

José Francisco Resende Salgado é natural de Teresina, Piauí, e graduado em Ciência da Computação pela Universidade Católica de Brasília (UCB), no Distrito Federal. Atualmente atua como gerente de serviços em uma fábrica de software, liderando equipes e projetos voltados ao desenvolvimento de soluções tecnológicas para instituições públicas e privadas.

Com mais de 20 anos de experiência na área de tecnologia da informação, possui sólida atuação em projetos que utilizam metodologias ágeis (Scrum) e tradicionais (cascata), com foco em eficiência, inovação e entrega de valor. É certificado como Project Management Professional (PMP) pelo Project Management Institute (PMI), organização internacional referência em boas práticas de gerenciamento de projetos, e como Certified Scrum Master (CSM) pela Scrum Alliance, entidade reconhecida globalmente na promoção de metodologias ágeis.

Atualmente é mestrando em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, com foco em pesquisas voltadas ao cultivo doméstico sustentável, integrando tecnologias de agricultura de precisão e Internet das Coisas (IoT). Seu trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de soluções inteligentes e acessíveis para ambientes urbanos e residenciais, promovendo práticas sustentáveis e inovação tecnológica.

ÍNDICE

<i>DEDICATÓRIA</i>		4
<i>1. INTRODUÇÃO</i>		18
<i>2. OBJETIVOS</i>		21
<i>2.1. Objetivo geral</i>		21
<i>2.2. Objetivos específicos</i>		21
<i>3. CAPÍTULO I</i>		15
<i>3.1. Introdução</i>		30
<i>3.2. Material e Métodos</i>		32
<i>3.3. Resultados e Discussão</i>		34
<i>3.4. Conclusão</i>		42
<i>3.5. Referências Bibliográficas</i>		44
<i>4. CAPÍTULO II</i>		46
<i>4.1. Introdução</i>		31
<i>4.1.1. Agricultura vertical no mundo</i>		32
<i>4.1.2. Agricultura vertical no Brasil</i>		33
<i>4.1.3. Produção de alimentos em residências</i>		36
<i>4.1.4. Aspectos Sociais</i>		37
<i>4.1.5. Aspectos Econômicos</i>		38
<i>4.1.6. Aspectos de Sustentabilidade</i>		38
<i>4.1.7. Plataforma de Desenvolvimento Arduino</i>		39
<i>4.1.8. Plataforma de IoT Arduino Cloud</i>		41
<i>4.1.9. Cultivo escolhido</i>		43
<i>4.1.10. Método hidropônico escolhido</i>		44

4.2.	<i>Material e Método</i>	45
4.2.1.	<i>Pesquisa Experimental</i>	45
4.2.2.	<i>Pesquisa Quantitativa</i>	48
4.3.	<i>Resultados e Discussão</i>	54
4.3.1.	<i>Implantação dos sensores utilizados no MVP</i>	55
4.3.2.	<i>Utilização da Plataforma de Internet das Coisas (IoT)</i>	57
4.3.3.	<i>Preparação da Solução Nutritiva</i>	58
4.3.4.	<i>Circuito Elétrica do MVP:</i>	61
4.4.	<i>Conclusões</i>	63
4.4.1.	<i>Lições aprendidas do primeiro Cenário</i>	63
4.4.2.	<i>Análise dos dados Coletados</i>	66
4.5.	<i>Referência Bibliográficas</i>	82
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	84
	APÊNDICE A – LINHA DE PESQUISA E ENQUADRAMENTO NOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA CAPES	86
	APENDICE B - TECNOLOGIAS APLICADAS AO PROJETO	87
	APÊNDICE C - INVESTIMENTO DO PROJETO	101

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - PUBLICAÇÕES CULTIVO EM RESIDÊNCIAS.	35
TABELA 2 - CULTIVO EM RESIDÊNCIAS & IoT.....	36
TABELA 3 - CULTIVO EM RESIDÊNCIAS & AGRICULTURA DE PREVISÃO.....	38
TABELA 4 – CULTIVO EM RESIDÊNCIAS & IoT & AGRICULTURA DE PRECISÃO.	40
TABELA 6 - AGRICULTURA VERTICAL NAS PRINCIPAIS CIDADES NO BRASIL	35
TABELA 7 - RESUMO DAS CARACTERÍSTICAS DA PLATAFORMA ARDUÍNO.....	40
TABELA 8 - CULTIVOS ANALISADOS NA PESQUISA.	43
TABELA 9 - LISTA DE VARIÁVEIS DEPENDENTES.	46
TABELA 10 - VARIÁVEIS FIXAS.	47
TABELA 11 - PLANILHA GOOGLE COM DADOS COLETADOS.....	49
TABELA 12 - EXEMPLO DE DADOS INVÁLIDOS.....	53
TABELA 13 - COMPOSIÇÃO DE NUTRIENTES DA SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	59
TABELA 14 - CALIBRAGEM DA SOLUÇÃO.....	60
TABELA 15 - TABELA DE PINAGEM DO PROJETO.....	62
TABELA 16 - MÉDIAS DAS LEITURAS DAS VÁRIAS INDEPENDENTES A CADA CINCO DIAS..	69
TABELA 17 - PRINCIPAIS TIPO DE PINOS E FUNÇÕES DO ESP32.	91
TABELA 18 - CARACTERÍSTICAS DO SENSOR DHT22.....	93
TABELA 19 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO SENSOR DS18B20.	95
TABELA 20 - CARACTERÍSTICAS DO SENSOR VL53LOX.....	98
TABELA 21 - TABELA DE VALORES DOS PRINCIPAIS COMPONENTES.	101

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - DIAGRAMA DO CRUZAMENTO DA PESQUISA.	33
FIGURA 2 - FLUXO DE DADOS ENTRE AMBIENTE FÍSICO E IoT.	41
FIGURA 3 - PROCESSO DE CRESCIMENTO DO CULTIVO COM MÉTODO KRATKY.	45
FIGURA 4 - FLUXO DE INTEGRAÇÃO ENTRE A ESP32 E GOOGLE SHEET.	51
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DO CIRCUITO NO THINKCAD.	55
FIGURA 6 - MICROCONTROLADOR ESP 32 EM USO.	55
FIGURA 7 - PROTÓTIPO DA SOLUÇÃO.	56
FIGURA 8 - PLATAFORMA DE IoT EM FUNCIONAMENTO.	57
FIGURA 9 - MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS AMBIENTAIS NA PLATAFORMA IoT.	58
FIGURA 10 - ELABORAÇÃO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA.	60
FIGURA 11 - ESQUEMÁTICO DO CIRCUITO ELÉTRICO.	61
FIGURA 12 - DEMONSTRAÇÃO DA ILUMINAÇÃO INADEQUADA.	64
FIGURA 13 - CRESCIMENTO DO CULTIVO DA ALFACE POR DIA (ENTRE OS DIAS 07/05/2025 E 25/05/2025).	66
FIGURA 14 - MEDIÇÃO DO CRESCIMENTO DO CULTIVO DA ALFACE POR DIA (ENTRE OS DIAS 26/05/2025 E 09/06/2025). FONTE: (AUTOR, 2025)	68
FIGURA 15 - VISUALIZAÇÃO DOS INDICADORES NA PLATAFORMA DE IoT.	71
FIGURA 16 - VISUALIZAÇÃO DOS INDICADORES NO APLICATIVO MOBILE.	71
FIGURA 17 - CONECTIVIDADE DOS COMPONENTES DO PROJETO	89
FIGURA 18 - EXEMPLO DE MICROCONTROLADORES	90
FIGURA 19 - PINAGEM DO SENSOR DHT22	92
FIGURA 20 - DHT22 COM A ESP32.	94
FIGURA 21 - SENSOR DS18B20 UTILIZADO NO PROJETO.	96
FIGURA 22 - USO DO SENSOR DE PH X ESP32.	97
FIGURA 23 - DIMENSÕES DO SENSOR VL53LXX.	98
FIGURA 24 – DIAGRAMA EXPLICATIVO DO SENSOR DE DISTÂNCIA.	99
FIGURA 25 - USO DO SENSOR VL53L0X X ESP32.	100

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - PUBLICAÇÕES CULTIVO EM RESIDÊNCIAS.....	36
GRÁFICO 2 - CULTIVO EM RESIDÊNCIAS & IoT.	37
GRÁFICO 3 - AGRICULTURA DE PRECISÃO X CULTIVO EM RESIDÊNCIAS.	39
GRÁFICO 4 - CULTIVO EM RESIDÊNCIAS & IoT & AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	41
GRÁFICO 5 - MEDIÇÃO DO CRESCIMENTO DO CULTIVO DA ALFACE POR DIA (ENTRE OS DIAS 26/05/2025 E 09/06/2025).....	68

ÍNDICE DE SÍMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACÕES

ADC: (Analog-to-Digital Converter)

API: Application Programming Interface

CAPES: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESP32: Espressif Systems 32-bit Microcontroller

GAS: Google Apps Script

GPIO: General Purpose Input/Output

HTTP/HTTPS: HyperText Transfer Protocol / HyperText Transfer Protocol Secure

I2C : Inter-Integrated Circuit

IDE :Integrated Development Environment

IoT: Internet of Things (Internet das Coisas)

JSON: JavaScript Object Notation

LED - Light Emitting Diode

MQTT: Message Queuing Telemetry Transport

MVP - Minimum Viable Product

PID – Proporcional Integral Derivativo

PPGEAS - Programa de pós-graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

PVC - Policloreto De Vinila

PWM - Pulse Width Modulation

Wi-Fi: Wireless Fidelity

CAGR - Compound Annual Growth Rate

MVP – Minimum Viable Product (Produto Mínimo Viável)

RESUMO

Nos últimos cinco anos, a agricultura urbana no Brasil apresentou crescimento estimado de 50%, acompanhando a tendência global voltada à sustentabilidade, segurança alimentar e resiliência urbana. O cultivo doméstico de hortaliças tem se consolidado como alternativa viável para promover autonomia alimentar e acesso a alimentos saudáveis, especialmente em áreas densamente povoadas. Apesar dos avanços, o cultivo doméstico enfrenta desafios significativos, como a escassez de dados técnicos sobre sua eficiência em longo prazo, limitações de infraestrutura, baixos investimentos públicos e carência de conhecimento técnico entre os agricultores urbanos. Estudos indicam a necessidade de abordagens interdisciplinares para compreender os impactos sociais, econômicos e ambientais dessa prática. O desenvolvimento e a democratização de tecnologias de monitoramento de baixo custo surgem como fatores-chave para ampliar sua adoção. A integração entre agricultura de precisão e Internet das Coisas (IoT) tem revolucionado os sistemas de cultivo, permitindo decisões baseadas em dados em tempo real. Essa abordagem favorece cultivos inteligentes, adaptáveis às condições ambientais, promovendo sustentabilidade, segurança alimentar e engajamento social. Este projeto propõe o desenvolvimento de uma solução computacional para monitoramento e controle de parâmetros ambientais em cultivos sustentáveis residenciais. A proposta envolve a criação de um Produto Mínimo Viável (MVP), integrando sensores físicos a um microprocessador ESP32 e uma plataforma IoT em nuvem, com foco em eficiência, escalabilidade e baixo custo. A pesquisa está estruturada em dois capítulos: o primeiro apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre cultivo doméstico com tecnologias digitais, evidenciando o crescimento do interesse acadêmico a partir de 2020. O segundo capítulo descreve o desenvolvimento e validação de um sistema inteligente para o cultivo de alface crespa em ambientes residenciais, demonstrando a viabilidade técnica e alinhamento com os princípios da agricultura urbana inteligente.

Palavras-chave: IoT, agricultura de precisão, cultivo em residências, agricultura urbana, automação

ABSTRACT

Over the past five years, urban agriculture in Brazil has grown by an estimated 50%, reflecting a global trend focused on sustainability, food security, and urban resilience. The domestic cultivation of vegetables has emerged as a viable alternative to promote food autonomy and access to healthy product, especially in densely populated urban areas. Precision agriculture, traditionally applied to large-scale farming, is now being adapted to urban contexts through technologies such as sensors, automation, and data analysis. Despite its benefits, domestic vegetable cultivation faces significant challenges, including a lack of technical data on long-term efficiency, limited infrastructure, low public investment, and insufficient technical knowledge among urban growers. Studies highlight the need for interdisciplinary approaches to understand the social, economic, and environmental impacts of this practice. The development and democratization of low-cost monitoring technologies are key factors in expanding its adoption. The integration of precision agriculture and the Internet of Things (IoT) has revolutionized cultivation systems by enabling real-time, data-driven decision-making. This approach supports intelligent crops that adapt to environmental conditions, promoting sustainability, food security, and social engagement. In addition to producing healthy and traceable food, these solutions strengthen food self-sufficiency and encourage ecological and educational practices within society. This research proposes the development of a computational solution for monitoring and controlling environmental parameters in sustainable residential cultivation. The proposal involves the creation of a Minimum Viable Product (MVP), integrating physical sensors with an ESP32 microprocessor and a cloud-based IoT platform, focusing on efficiency, scalability, and low cost. The study is structured into two chapters: the first presents a systematic literature review about domestic cultivation with digital technologies, highlighting the growing academic interest since 2020. The second chapter describes the development and validation of an intelligent system for cultivating curly lettuce in residential environments, demonstrating its technical feasibility and alignment with the principles of smart urban agriculture.

Keywords: IoT, control systems, home cultivation, vertical farming, automation

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos cinco anos, a agricultura urbana no Brasil apresentou crescimento estimado de 50%, refletindo a tendência global voltada à sustentabilidade e à segurança alimentar. O cultivo doméstico de hortaliças emergiu como resposta à crescente demanda por autonomia alimentar e por alimentos saudáveis, frescos e livres de agrotóxicos, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Essa prática fortalece a segurança alimentar familiar, melhora a qualidade da dieta e contribui para maior conscientização sobre práticas agroecológicas.

No Brasil, políticas públicas como o Programa Nacional de Agricultura Urbana e Periurbana (PNAUP), instituído pelo Decreto nº 11.700/2023¹, têm incentivado o uso de espaços urbanos para produção de alimentos, promovendo o uso sustentável do solo e a inclusão social por meio da agricultura comunitária.

Apesar dos benefícios, o cultivo doméstico de hortaliças enfrenta desafios importantes, como a escassez de dados técnicos sobre a eficiência em longo prazo, carência de infraestrutura, investimentos públicos e conhecimento técnico entre os agricultores urbanos. Estudos apontam a necessidade de abordagens interdisciplinares para mapear os impactos sociais, econômicos e ambientais dessa. Adicionalmente, o desenvolvimento e acesso a tecnologias de monitoramento de baixo custo podem ser determinantes para ampliar a utilização.

A agricultura de precisão integra tecnologias de sensoriamento, automação e análise de dados para otimizar o uso de recursos, aumentar a produtividade e mitigar impactos ambientais. Essa abordagem, antes restrita a grandes propriedades, vem sendo adaptada a contextos urbanos, por meio de sistemas inteligentes que possibilitam monitoramento contínuo de variáveis ambientais como hortas domésticas, promovendo práticas sustentáveis e eficientes.

Em paralelo, o avanço da *Internet of Things* - Internet das Coisas (IoT) - da inteligência artificial (IA) e da conectividade 5G tem viabilizado a expansão da agricultura inteligente para grandes e pequenas propriedades, além de ambientes urbanos. A combinação da agricultura de precisão com o uso de sensores, microcontroladores e plataformas em nuvem têm possibilitado o desenvolvimento de sistemas capazes de

¹ https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2023/decreto/D11700.htm

monitorar e ajustar variáveis como temperatura, umidade e pH, otimizando o manejo do cultivo mesmo em espaços reduzidos.

A convergência entre IoT e agricultura de precisão tem revolucionado os sistemas de cultivo ao permitir decisões baseadas em dados em tempo real. Sensores conectados medem parâmetros ambientais como temperatura, umidade do solo, luminosidade e crescimento das plantas, cujas informações são transmitidas a servidores em nuvem e analisadas por algoritmos de IA. Esse sistema promove não apenas maior produtividade, mas também redução de desperdícios e uso eficiente dos insumos.

A adoção dessas tecnologias em contextos urbanos contribui para a criação de cultivos inteligentes que se adaptam automaticamente às condições ambientais, favorecendo a sustentabilidade, a segurança alimentar e o engajamento social. Além de gerar alimentos saudáveis e rastreáveis, essas soluções fortalecem a autossuficiência alimentar e incentivam práticas ecológicas e educativas na sociedade.

Este projeto de pesquisa propõe o desenvolvimento de uma solução computacional para monitoramento e controle de parâmetros ambientais de um cultivo sustentável em residências. A proposta envolve a elaboração de um MVP (*Minimum Viable Product* – Mínimo Produto Viável) que consiga demonstrar a integração entre sensores conectados a um microprocessador ESP32 e uma plataforma IoT em nuvem, que permitirá o monitoramento preciso da temperatura, umidade, pH, luminosidade e crescimento do cultivo escolhido. A iniciativa visa demonstrar a viabilidade do uso de IoT e da agricultura de precisão adaptada ao ambiente doméstico urbano, com foco em sustentabilidade, eficiência e escalabilidade.

O Capítulo 1, propõe uma revisão sistemática da literatura sobre o cultivo de alimentos em ambientes residenciais, com foco na aplicação de tecnologias da Internet das Coisas (IoT) e nos princípios da agricultura de precisão. A pesquisa utilizou a plataforma *Crossref*² para analisar publicações entre 2015 e 2025, categorizando estudos sobre cultivo doméstico e a integração com tecnologias digitais. Os resultados apontam um crescimento significativo do interesse acadêmico a partir de 2020, impulsionado por temas como sustentabilidade urbana, segurança alimentar e acesso a inovações tecnológicas.

² <https://www.crossref.org/>

O Capítulo II, propõe o desenvolvimento e validação de um sistema inteligente baseado em Internet das Coisas (IoT) e inteligência artificial para o monitoramento do cultivo de alface crespa em ambientes residenciais, visando suprir a lacuna na literatura sobre o uso dessas tecnologias em pequenos cultivos urbanos. A metodologia aplicada, experimental e quantitativa, envolveu desde o levantamento de requisitos até a construção de um Produto Mínimo Viável (MVP), utilizando sensores físicos, plataforma em nuvem e princípios de desenvolvimento de software. Os resultados demonstram que o sistema permite o monitoramento automatizado de variáveis ambientais e o armazenamento de dados em nuvem, contribuindo para a otimização do crescimento vegetal, práticas sustentáveis, uso eficiente de recursos e baixo custo de implementação, alinhando-se aos princípios da agricultura urbana inteligente.

No apêndice A, é apresentado a aderência do projeto com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS), na medida em que está inserido em um contexto de inovação e desenvolvimento técnico, com foco na sustentabilidade. Esse estudo está alinhado à Linha II do programa, voltada à gestão e tecnologias ambientais, e propõe o desenvolvimento de práticas sustentáveis aplicadas à agricultura urbana.

No apêndice B, descreve as tecnologias aplicadas na construção do projeto, utilizadas no desenvolvimento do MVP voltado ao monitoramento ambiental de cultivos residenciais. A aplicação dessas tecnologias demonstrou a viabilidade de soluções inteligentes e acessíveis para agricultura urbana, promovendo automação, sustentabilidade e eficiência no uso de recursos naturais.

No apêndice C, apresenta os custos consolidados do projeto, listando os principais materiais utilizados na construção do MVP, concluindo que o investimento é considerado viável para um protótipo acadêmico, mantendo a proposta de acessibilidade e escalabilidade.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Este projeto tem como objetivo desenvolver uma solução computacional para o monitoramento e controle de parâmetros ambientais no cultivo sustentável em ambientes residenciais com o uso de sensores e componentes físicos integrados a uma plataforma de Internet das Coisas (IoT), demonstrando a viabilidade da agricultura de precisão adaptada ao ambiente doméstico urbano, com foco em sustentabilidade, eficiência e escalabilidade.

2.2. Objetivos específicos

1. Desenvolver um MVP (Minimum Viable Product) de uma solução computacional capaz de realizar o monitoramento dos parâmetros ambientais — temperatura, umidade, pH (potencial hidrogeniônico), luminosidade e crescimento de um cultivo em residência — por meio da integração de sensores físicos a uma plataforma de Internet das Coisas (IoT).
2. Realizar de forma remota o monitoramento e controle em tempo real das condições climáticas do ecossistema ambiental, no qual o cultivo escolhido foi inserido a partir do MVP desenvolvido.
3. Monitorar os indicadores de crescimento do cultivo de forma automática e armazenar essas informações em nuvem, com a finalidade de produzir indicadores que permitam a tomada de decisão para potencializar o crescimento vegetativo do cultivo.
4. Fomentar o uso da produção sustentável com eficiência energética e baixo custo em residências, utilizando os conceitos da internet das coisas.

3. CAPÍTULO I

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA DO CULTIVO DE ALIMENTOS EM RESIDÊNCIAS COM USO DA INTERNET DAS COISAS (IOT) E AGRICULTURA DE PRECISÃO

RESUMO

A agricultura urbana tem se destacado como estratégia para melhorar a qualidade da alimentação, fortalecer a segurança alimentar e promover o bem-estar da população. O avanço de tecnologias de baixo custo, como sensores ambientais, sistemas hidropônicos e microcontroladores, tem permitido a aplicação da agricultura de precisão e da Internet das Coisas (IoT) em residências, viabilizando o monitoramento remoto de variáveis críticas ao cultivo. Contudo, a literatura sobre o uso de IoT e agricultura de precisão em ambientes domésticos ainda é limitada e fragmentada, dificultando a consolidação teórica do campo e a recuperação eficiente dos estudos nas bases científicas. Este trabalho busca consolidar dados quantitativos de publicações entre 2015 e 2025 relacionadas ao cultivo em residências com tecnologias digitais, utilizando a API da Crossref e adotando a Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS) com abordagem top-down. Os resultados indicam que, a partir de 2020, houve tendência crescente de aplicação da agricultura de precisão com IoT no cultivo doméstico, mostrando uma alternativa promissora para fomentar produções sustentáveis e reduzir a insegurança alimentar em ambientes urbanos.

Palavras-chave: agricultura urbana, Internet das Coisas, agricultura de precisão, cultivo em residências, sustentabilidade.

ABSTRACT

Urban agriculture has emerged as a strategy to improve food quality, strengthen food security, and promote population well-being. The advancement of low-cost technologies, such as environmental sensors, hydroponic systems, and microcontrollers, has enabled the application of precision agriculture and the Internet of Things (IoT) in residential settings, allowing remote monitoring of critical cultivation variables. However, the literature about the use of IoT and precision agriculture in domestic environments remains limited and fragmented, hindering theoretical consolidation and efficient retrieval of studies in scientific databases. This work aims to consolidate quantitative data on publications from 2015 to 2025 related to home-based cultivation using digital technologies, employing the Crossref API and a top-down Systematic Literature Review (SLR) approach. The results indicate that, starting in 2020, there has been a growing trend in applying precision agriculture with IoT in domestic cultivation, representing a promising alternative to foster sustainable production and reduce food insecurity in urban areas.

Keywords: urban agriculture, Internet of Things, precision agriculture, home cultivation, sustainability.

3.1. Introdução

O cultivo de alimentos em residências é uma prática ancestral, presente em diversas civilizações ao longo da história, com o objetivo de garantir a subsistência e a segurança alimentar das famílias. Desde tempos antigos, hortas domésticas eram comuns tanto em áreas rurais quanto urbanas, servindo como fontes diretas de vegetais, ervas e frutas.

Com o avanço da urbanização e a industrialização do sistema alimentar ao longo do século XX, houve redução significativa na prática do cultivo em áreas residenciais. As populações urbanas passaram a depender cada vez mais da cadeia produtiva comercial, afastando-se da produção direta de alimentos. No entanto, nas últimas décadas, o crescimento da consciência ambiental, a preocupação com os agrotóxicos, a busca por sustentabilidade e os altos custos dos alimentos orgânicos impulsionaram o retorno do cultivo em pequena escala nas cidades (MORK *et al.*, 2014; SANTO, PALMAR & KIM, 2016). A agricultura urbana, nesse contexto, passou a ser vista como uma ferramenta estratégica para melhorar a qualidade da alimentação, fortalecer a segurança alimentar e promover o bem-estar físico e mental dos cidadãos.

Nos últimos anos, o desenvolvimento de tecnologias de baixo custo e fácil aplicação, como sensores ambientais, sistemas hidropônicos e automação por meio de microcontroladores, permitiu que práticas de agricultura de precisão e Internet das Coisas (IoT) fossem adaptadas ao ambiente doméstico. Essa integração tecnológica tem possibilitado o monitoramento e controle de variáveis críticas ao cultivo — como temperatura, umidade, pH do solo e luminosidade — de forma remota e eficiente (KUMAR *et al.*, 2019; OLIVEIRA *et al.*, 2021). Com isso, o cultivo em residências passa de uma prática tradicional para uma atividade tecnicamente sofisticada e alinhada aos princípios da sustentabilidade, inovação e resiliência urbana.

A dificuldade em encontrar referências bibliográficas específicas que tratem do cultivo em residências utilizando Internet das Coisas (IoT), associada à agricultura de precisão, decorre principalmente do caráter emergente, interdisciplinar e ainda pouco consolidado dessa linha de pesquisa. A literatura científica apresenta vasta produção voltada para a aplicação de IoT na agricultura comercial ou rural de grande escala, com foco em ganhos de produtividade, automação de processos e gestão de recursos naturais (ZHOU *et al.*, 2020; WAHYUNI *et al.*, 2021). No entanto, quando se restringe a busca

ao contexto de ambientes domésticos ou urbanos, as publicações tornam-se mais escassas, fragmentadas e, muitas vezes, dispersas em diferentes áreas do conhecimento.

Essa escassez pode ser explicada, em parte, pela dificuldade de padronização terminológica e ausência de um vocabulário controlado, o que compromete a indexação e recuperação eficiente desses materiais nas principais bases de dados científicos como Web of Science³ e Portal de Periódicos CAPES⁴. Além disso, muitos estudos relacionados ao tema são apresentados em forma de artigos de conferência, relatórios técnicos ou projetos de extensão e inovação tecnológica, os quais nem sempre são publicados em periódicos de alto fator de impacto ou amplamente indexados (ALFONSI; SANTOS, 2023; MAHAPATRA *et al.*, 2022).

Mesmo diante dessas limitações, observa-se uma tendência crescente de interesse acadêmico pelo tema, especialmente após 2020, motivada por questões como segurança alimentar, sustentabilidade urbana e resiliência tecnológica em cenários de crise, como a pandemia de COVID-19. Essa conjuntura favoreceu o aumento de investigações voltadas ao uso de microcontroladores (como ESP32), sensores ambientais, plataformas em nuvem e automação inteligente em hortas domésticas, com vistas à promoção de autonomia alimentar e práticas agrícolas sustentáveis em centros urbanos (RAJ *et al.*, 2021; PEREIRA *et al.*, 2020). Dessa forma, embora o campo ainda careça de consolidação teórica, representa uma oportunidade relevante de contribuição científica e tecnológica, tanto pela inovação quanto pela aplicabilidade prática.

A comunicação científica contemporânea depende de sistemas digitais confiáveis que permitam o acesso, o compartilhamento e a preservação de publicações científicas de forma segura, transparente e padronizada. Nesse cenário, as plataformas de infraestrutura digital aberta desempenham papel essencial ao proporcionar um ecossistema global e interoperável para a disseminação do conhecimento científico.

Entre os principais elementos que sustentam essa infraestrutura, destacam-se os Identificadores Digitais de Objetos (DOIs — Digital Object Identifiers), que funcionam como identificadores permanentes e únicos para objetos digitais, como artigos científicos, *datasets*, capítulos de livros, teses e outras produções acadêmicas. O DOI assegura que

³ <https://www.webofscience.com/wos/>

⁴ <https://www.periodicos.capes.gov.br>

um conteúdo digital possa ser facilmente localizado e citado, independentemente de mudanças no endereço ou na plataforma de hospedagem.

Esse trabalho tem o propósito de consolidar informações quantitativas das produções científicas dos últimos dez anos, entre 2015 e 2025, com o tema cultivo em residências que utilizaram tecnologias inerentes a internet das coisas e agricultura de precisão. A plataforma utilizada como fonte de dados foi a Crossref, esse ambiente consiste como uma plataforma aberta e sem fins lucrativos, permitindo que editores, instituições de pesquisa, universidades e organizações científicas registrem dois e associem metadados padronizados às suas publicações.

3.2. Material e Métodos

Esse estudo adotou a metodologia de Revisão Bibliográfica Sistemática (RBS), conforme Biolchini *et al.* (2007) e Levy e Ellis (2006), visando fundamentação teórica sólida e abordagem top-down na revisão bibliográfica, iniciando com uma visão ampla e avançando para interseções temáticas específicas. A pesquisa foi dividida em quatro etapas: (1) quantificação de publicações sobre cultivo em residências, com uso de palavras-chave em português e inglês; (2) análise da relação entre cultivo em residências e Internet das Coisas (IoT); (3) investigação da conexão entre cultivo doméstico e agricultura de precisão; e por fim, (4) estudo das publicações que integram os três temas: cultivo em residências, IoT e agricultura de precisão.

Conforme já citado na introdução, a base de dados utilizada para quantificar as publicações de periódicos científicos vinculados ao cultivo em residências, tema principal de estudo, utilizou a fonte de dados a plataforma API do Crossref. Esse ambiente consiste em uma organização sem fins lucrativos dedicada à oferta de infraestrutura digital, aberta para a comunicação científica global. A Crossref é a principal agência de registro de Identificadores Digitais de Objetos (DOIs) da Fundação Internacional DOI, que interliga metadados de publicações científicas de diversas editoras, instituições acadêmicas e órgãos de fomento.

A primeira etapa da pesquisa consistiu na quantificação de produções científicas com o foco no cultivo em residências, por meio da identificação da quantidade de publicações por ano relacionadas a palavras-chave: "Cultivo em Residências" ou "*Home-Based Cultivation*". A fim de trazer maior número de publicações, foi utilizada palavras-chaves em português e inglês, para esse cenário.

A segunda etapa consistiu na análise da interseção entre o cultivo em residências e Internet of Things (IoT), na tentativa de mapear soluções tecnológicas com esse contexto.

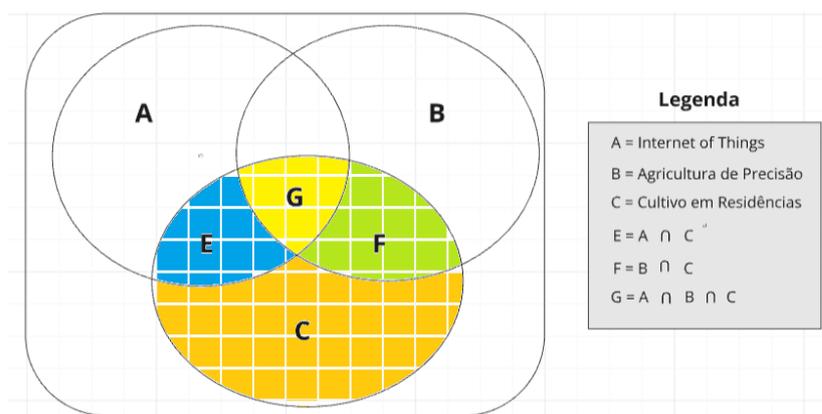
A terceira etapa concentrou-se na análise da interseção entre cultivo em residências e o tema agricultura de precisão, também na tentativa de mapear automações utilizadas em cultivos residências.

A quarta etapa, concentrou-se em trazer dados da junção dos três temas utilizados simultaneamente, com as palavras-chaves: cultivo em residências e *Internet of Things* - IoT e agricultura de precisão.

Com o propósito de estabelecer um recorte temporal, a presente pesquisa delimitou a busca bibliográfica nas publicações dos últimos dez anos, compreendendo o período entre 2015 e 2025. Para assegurar viabilidade técnica e relevância estatística da análise, foi definido um limite máximo de 10.000 registros por consulta.

Para ilustrar a relação entre os principais temas investigados neste estudo — Cultivo em residências com IoT e agricultura de precisão — foi utilizado o diagrama de Venn como instrumento visual de apoio à organização conceitual da revisão bibliográfica, Figura 1. Esse tipo de representação gráfica é amplamente utilizado em estudos de mapeamento temático pela capacidade de visualizar interseções e exclusões entre conjuntos conceituais (Higgins & Green, 2011).

Figura 1 - Diagrama do cruzamento da pesquisa.



Autor (2025).

Conforme mapeado na Figura 1, os pontos coloridos indicam o universo de concentração das consultas, conforme a legenda. As interseções que foram utilizadas corresponderam aos seguintes conjuntos:

- a. **C**, publicações do cultivo em residências;
- b. **E** = $(A \cap C)$, publicações que **associam** IoT e cultivo em residências;
- c. **F** = $(B \cap C)$, **publicações** de trabalhos que tratam da agricultura de precisão e cultivo em residências; e
- d. **G** = $(A \cap B \cap C)$, a **convergência** temática entre os três domínios, ou seja, os estudos que integram tecnologia IoT, agricultura de precisão e cultivo em residências.

Para melhor demonstração dos resultados obtidos, os dados foram consolidados em tabelas e em gráficos no formato de área com o propósito de apresentar a evolução e tendência das amostras de produções científicas para os respectivos anos do estudo.

Cabe ressaltar que este trabalho foi realizado em junho de 2025, nesse sentido a aparente redução dos quantitativos apurados de publicações em 2025, ocorreu porque os dados de 2025 foram coletados em junho desse ano, não refletindo o total anual, portanto ocorre limitação temporal da análise.

3.3. Resultados e Discussão

A primeira etapa, Tabela 3, trouxe a visão do total de publicações direcionadas ao cultivo em residências a fim de se ter um panorama geral desses tipos de trabalhos, visão *top-down* do contexto desse estudo, Figura 1, letra C.

Entre 2015 e 2025, observa-se crescimento consistente na quantidade de publicações científicas relacionadas ao tema cultivo em residências, com destaque para os anos de 2022, 2023 e 2024, que juntos representam mais de 36% do total de publicações.

O pico ocorreu em 2023, com 1.224 publicações (12,9%), seguido de perto por 2024 com 1.187 publicações (12,5%). Esse crescimento pode estar associado à maturação das pesquisas e ao aumento do interesse acadêmico por temas emergentes ligados à inovação e sustentabilidade, Tabela 1.

Tabela 1 - Publicações Cultivo em Residências.

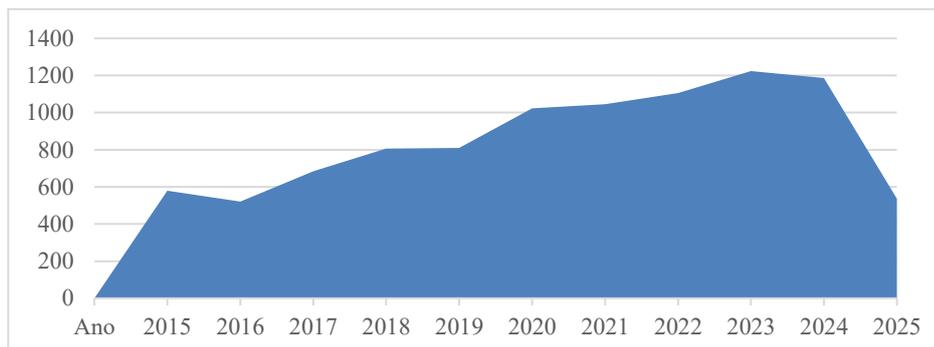
Ano	Publicações	Percentual (%)
2015	579	6,1
2016	521	5,5
2017	685	7,2
2018	806	8,5
2019	810	8,5
2020	1023	10,7
2021	1046	11,0
2022	1106	11,6
2023	1224	12,9
2024	1187	12,5
2025	536	5,6
Total	9523	100,0

Fonte: Autor (2025).

Por outro lado, os anos de 2015 a 2017, conforme apresentados na Tabela 1, registraram percentuais mais modestos, somando aproximadamente 18,8% das publicações totais. O ano de 2016 foi o de menor representatividade (5,5%), enquanto 2017 já apresentou leve crescimento (7,2%). Em 2025, nota-se queda, tendo em vista que a pesquisa foi realizada no mês de junho/2025. De forma geral, a curva ascendente até 2024 indica um período de intensificação das pesquisas, refletindo o avanço tecnológico e o fortalecimento das redes de colaboração científica.

No mapa de área da Gráfico 1, reforça visualmente a tendência de crescimento nas publicações científicas ao longo do período de 2015 a 2024, com um pico evidente em 2023. A área sombreada demonstra evolução constante, especialmente a partir de 2017, indicando fortalecimento da produção acadêmica no tema analisado. O salto significativo entre 2019 e 2020, e posteriormente entre 2021 e 2023, evidencia momentos de maior intensidade na atividade científica.

Gráfico 1 - Publicações cultivo em residências.



Fonte: Autor (2025).

O comportamento geral da curva demonstra consolidação do tema na agenda científica, alcançando o auge em 2023 com mais de 1.200 publicações. Esse cenário reafirma o interesse crescente da comunidade científica ao longo da última década.

A segunda etapa da consulta realizada demonstrada na Tabela 2, consolida as publicações científicas entre 2015 e 2025 relacionadas a trabalhos publicados, vinculados ao cultivo em residências que tenha utilizado internet das coisas em algum tipo de solução, conforme apresentado na Figura 1, letra E.

Tabela 2 - Cultivo em residências & IoT.

Ano	Publicações	Percentual (%)
2015	174	2,05
2016	341	4,02
2017	319	3,76
2018	502	5,91
2019	695	8,18
2020	745	8,77
2021	1018	11,99
2022	1154	13,59
2023	1166	13,73
2024	1413	16,64
2025	965	11,36
Total	8492	100

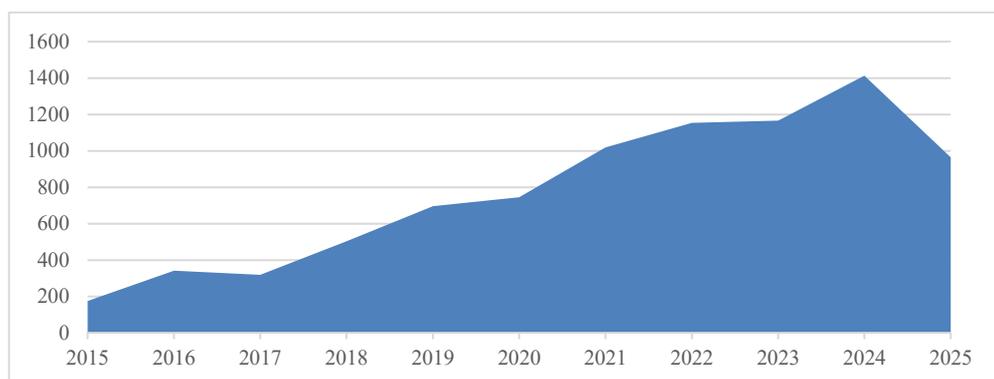
Fonte: Autor (2025).

Podendo considerar nos primeiros anos (2015 a 2018), o volume ainda era modesto — variando de 2,05% a 5,91% do total — apontando que os dois temas ainda se encontravam em fase inicial de discussão acadêmica. A partir de 2019, o número de publicações passa a crescer de forma significativa, alcançando 745 artigos em 2020 (8,77%) e superando a marca de mil publicações anuais entre 2021 e 2025.

O pico ocorreu em 2024, com 1.413 publicações, representando 16,64% do total registrado no intervalo, seguido de 2023 (13,73%) e 2022 (13,59%), evidenciando uma consolidação do tema na agenda científica internacional. Ao todo, as publicações com esses dois tópicos geraram 8.492 publicações no período analisado, confirmando a relevância crescente no campo das ciências aplicadas e interdisciplinares, especialmente em contextos urbanos e tecnológicos voltados à autonomia alimentar e uso racional de recursos com uso de IoT.

O gráfico da Gráfico 2, mostra não apenas o aumento quantitativo das publicações, mas também um indicador claro da maturidade científica da integração entre cultivo em residências e IoT. Essa intersecção transforma-se ao longo dos anos de um nicho experimental para uma linha de pesquisa consolidada e altamente estratégica, com impactos diretos na qualidade de vida, sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica.

Gráfico 2 - Cultivo em residências & IoT.



Fonte: Autor (2025).

Pico em 2024 (~1400 publicações), pode refletir avanços tecnológicos, maior conscientização sobre agricultura urbana, ou políticas públicas incentivando práticas sustentáveis. A aparente redução no número de publicações em 2025 deve-se ao fato de que os dados foram coletados em junho daquele ano, não refletindo o total anual.

Portanto, essa queda não representa uma tendência de desinteresse, mas sim uma limitação temporal da análise.

A terceira etapa da pesquisa, Tabela 3, trouxe os resultados de publicações vinculadas ao cultivo em residências com agricultura de precisão. Esse resultado foi possível realizando a interseção entre esses dois temas no período de 2015 a 2025, conforme apresentado na Figura 1, letra E (verde).

Tabela 3 - Cultivo em residências & agricultura de precisão.

Ano	Publicações	Percentual (%)
2015	643	10,82
2016	326	5,48
2017	364	6,12
2018	370	6,22
2019	406	6,83
2020	630	10,6
2021	683	11,49
2022	619	10,41
2023	695	11,69
2024	891	14,98
2025	319	5,36
Total	5946	100

Fonte: Autor (2025).

Foi possível destacar que o volume de publicações quantifica um crescimento progressivo ao longo dos anos, com destaque especial para os anos de 2023 (695 publicações, 11,69%) e 2024 (891 publicações, 14,98%), que representam os maiores picos de produção no período analisado.

Embora o número de publicações tenha sido relativamente modesto até 2018, observa-se a partir de 2020 uma consolidação do tema, com os anos subsequentes mantendo altos índices de publicações. O ano de 2021 também se destaca com 683 publicações (11,49%), reforçando a tendência de crescimento. A distribuição percentual

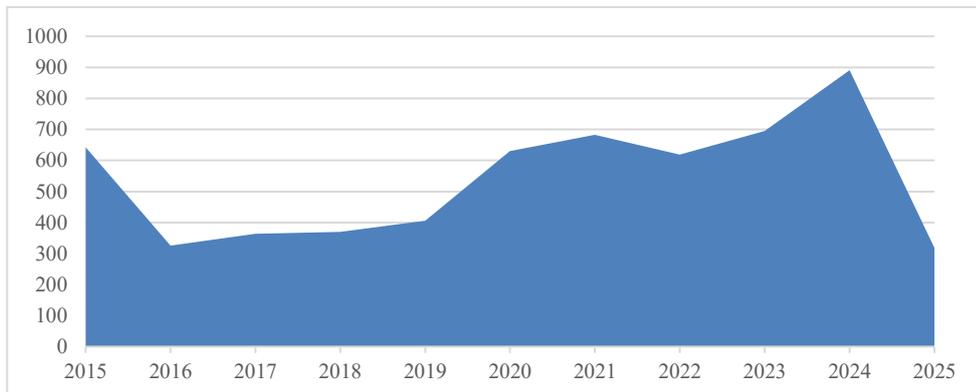
demonstra que cerca de 68% das publicações ocorreram entre 2020 e 2025, consolidando esse período como o mais produtivo e indicativo do amadurecimento do tema na literatura científica.

O gráfico de área do Gráfico 3, observa-se que a produção científica relacionada ao cultivo em residências com agricultura de precisão, entre os anos de 2015 e 2025, passou por diferentes fases de maturação e consolidação.

Em 2015, o número de publicações foi surpreendentemente alto (643 publicações, 10,82%), revelando que o tema já despertava interesse significativo na comunidade científica.

No entanto, os anos seguintes (2016 e 2017) apresentaram queda acentuada na produção, indicando possível dificuldade em operacionalizar as propostas iniciais ou limitações tecnológicas e estruturais para aplicar os conceitos da agricultura de precisão em ambientes residenciais e urbanos.

Gráfico 3 - Agricultura de precisão x cultivo em residências.



Fonte: Autor (2025).

A partir de 2018, observa-se um período de reorganização e retomada do fôlego da pesquisa, com crescimento constante até 2020. Esse crescimento está possivelmente relacionado à popularização de tecnologias acessíveis como sensores, microcontroladores e plataformas IoT, bem como ao impacto da pandemia de COVID-19, que reacendeu o interesse por autonomia alimentar e agricultura urbana.

A última etapa, Tabela 4, teve como alvo produções científicas que demonstrasse o cultivo em residências com uso de IoT e algum tipo de automação

vinculado a agricultura de precisão, entre os anos de 2015 e 2025, Figura 1, letra C (amarelo).

Tabela 4 – Cultivo em residências & IoT & agricultura de precisão.

Ano	Publicações	Percentual (%)
2015	405	5,2
2016	326	4,19
2017	308	3,96
2018	413	5,31
2019	577	7,42
2020	700	9
2021	949	12,2
2022	1003	12,89
2023	1082	13,91
2024	1326	17,05
2025	690	8,87
Total	7779	100

Fonte: Autor (2025).

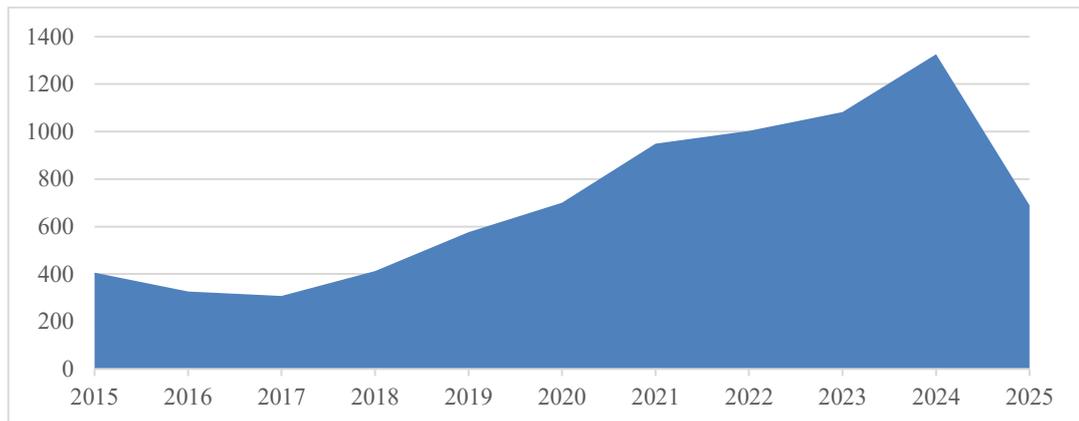
A série histórica demonstra crescimento constante nas publicações, partindo de 405 publicações em 2015 para um pico expressivo de 1.326 publicações em 2024, o que representa 17,05% do total acumulado. A partir de 2020, observa-se aceleração nítida, sendo que mais de 74% das publicações estão concentradas entre 2020 e 2025, com destaque também para 2023 (13,91%) e 2022 (12,89%).

A consolidação dessa linha de pesquisa sugere crescente demanda por soluções sustentáveis, inteligentes e de pequena escala para produção de alimentos. A articulação entre cultivo em residências, agricultura de precisão e IoT passou de uma proposta inovadora para um campo de estudo estabelecido, com grande potencial de aplicação prática em ambientes urbanos, sobretudo em cenários de segurança alimentar e sustentabilidade.

O gráfico da Gráfico 4, não apenas mostra a popularidade crescente da pesquisa nesse campo, mas evidencia a evolução da maturidade tecnológica e científica. A curva ascendente, especialmente a partir de 2020, pode ser entendida como reflexo direto de

demanda global por soluções sustentáveis, com foco em produção de alimentos em pequena escala, automação acessível e conectividade inteligente em ambientes domésticos.

Gráfico 4 - Cultivo em residências & IoT & agricultura de precisão.



Fonte: Autor (2025).

3.4. Conclusão

Como conclusão do presente estudo que consistiu em realizar uma revisão literária das produções acadêmicas, inerentes ao cultivo em residências, procurou trazer nesse contexto, trabalhos vinculados, possíveis projetos com uso de IoT e agricultura de precisão, pode-se concluir alguns pontos importantes.

A primeira etapa, Tabela 1, quando a pesquisa concentrou em trazer trabalhos acadêmicos dos últimos dez anos, exclusivamente com o foco de cultivo em residências, observou-se crescimento consistente no número de estudos, com destaque para os anos de 2022, 2023 e 2024, que juntos concentram mais de 36% do total de publicações. O ano de 2023 representou o ponto mais alto, com 1.224 publicações (12,9%), seguido de perto por 2024 com 1.187 (12,5%). Esse aumento reflete a consolidação do tema no meio acadêmico, impulsionado pelo interesse em inovação, sustentabilidade e segurança alimentar.

Nesse sentido, a estabilidade e a intensidade das publicações nos últimos anos demonstram que o tema atingiu maturidade e atratividade, indicando um campo promissor para futuras pesquisas e aplicações tecnológicas voltadas à sustentabilidade e bem-estar urbano com o cultivo em residência.

Na segunda etapa, quando abordado simultaneamente o cultivo em residências com o uso de IoT, Tabela 2, para os últimos dez anos, identificou-se que os primeiros anos do período analisado (2015 a 2018) apresentaram um volume relativamente modesto de publicações, indicando que essa intersecção temática ainda estava em fase inicial de exploração acadêmica. A partir de 2019, observa-se crescimento expressivo, especialmente a partir de 2020, quando o número de trabalhos ultrapassou 700 publicações e manteve trajetória ascendente.

Entre 2021 e 2025, todos os anos superaram a marca de mil publicações, com destaque para 2024, que atingiu o pico de 1.413 publicações (16,64% do total). Esse movimento reforça a consolidação do tema como um campo relevante de pesquisa, refletindo o amadurecimento do debate científico sobre soluções tecnológicas aplicadas ao cultivo doméstico, passando de uma proposta experimental para se tornar uma linha estratégica de pesquisa com alto potencial de impacto em áreas como sustentabilidade, inovação tecnológica e segurança alimentar em contextos urbanos.

Na Tabela 3, terceira etapa da investigação, que buscou trazer uma reflexão de soluções automatizadas no uso de agricultura de precisão no cultivo em residências pode-se concluir que apesar de um início promissor em 2015, com 643 publicações (10,82%), os anos subsequentes (2016 e 2017) apresentaram retração, o que pode sugerir dificuldades técnicas e estruturais para adaptar os conceitos da agricultura de precisão aos contextos residenciais.

A retomada da produção a partir de 2018 foi marcada por crescimento progressivo e constante, culminando em um período altamente produtivo entre 2020 e 2025. Nesse intervalo, concentram-se cerca de 68% do total de publicações, evidenciando a consolidação do tema. Essa última etapa foi impulsionada, possivelmente, pela disseminação de tecnologias acessíveis como sensores e microcontroladores, além do contexto da pandemia de COVID-19, que ampliou a busca por alternativas de produção alimentar em espaços urbanos. Assim, o tema evolui de um desafio técnico para uma linha estratégica de pesquisa em sustentabilidade, inovação e segurança alimentar.

A última etapa da pesquisa, representada pela Tabela 4, a combinação entre cultivo doméstico, sensores conectados e sistemas automatizados passou de um conceito emergente para uma abordagem prática e relevante, especialmente diante de desafios como segurança alimentar, sustentabilidade ambiental e urbanização crescente. A forte presença de publicações nos últimos anos demonstra que o campo está amadurecendo e tornando-se mais acessível, tanto em termos técnicos quanto econômicos. O cenário descrito aponta para um futuro promissor em que o cultivo inteligente e automatizado em ambientes urbanos residenciais pode desempenhar papel central na promoção de uma agricultura mais sustentável, conectada e resiliente.

A aparente redução no número de publicações em 2025 deve-se ao fato que os dados foram coletados em junho daquele ano, não refletindo o total anual. Portanto, essa queda não representa uma tendência de desinteresse, mas sim uma limitação temporal da análise. Todavia, nesse período consolida uma tendência de crescimento, pois os valores somam mais de 50% do volume no mês anterior.

3.5. Referências Bibliográficas

ALFONSI, M.; SANTOS, R. **Agricultura urbana e tecnologias sustentáveis: uma abordagem interdisciplinar**. Revista Brasileira de Desenvolvimento Sustentável, v. 9, n. 1, p. 45–62, 2023.

CASTRO, CÉSAR NUNES DE. **Agricultura urbana e periurbana: conceitos, experiências brasileiras e internacionais e o Programa Nacional de AUP**. In: SANTOS, Gesmar Rosa dos; VALADARES, Alexandre Arbex; SILVA, Sandro Pereira (Org.). **Agricultura e diversidades: trajetórias, desafios regionais e políticas públicas no Brasil**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea, 2025. v. 2. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br>. Acesso em: 20 ago. 2025.

KUMAR, R.; et al. **Smart farming using IoT: a review**. Journal of Agricultural Informatics, v. 10, n. 2, p. 1–10, 2019.

MAHAPATRA, R.; et al. **Smart urban farming using IoT and AI: a review**. Journal of Cleaner Production, v. 280, p. 124–135, 2022.

MOK, H. F.; et al. **Urban agriculture potential of Melbourne, Australia: a quantitative assessment**. Land Use Policy, v. 42, p. 1–14, 2014.

OLIVEIRA, J. P.; et al. **Aplicações da Internet das Coisas na agricultura de precisão: uma revisão sistemática**. Revista Engenharia, v. 27, n. 125, p. 1–20, 2021.

PEREIRA, L. M.; et al. **Agricultura urbana inteligente: automação e sustentabilidade em hortas domésticas**. Revista de Engenharia e Tecnologia Aplicada, v. 15, n. 2, p. 101–118, 2020.

RAJ, A.; et al. **IoT-based smart gardening system using ESP32**. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, v. 12, n. 4, p. 78–85, 2021. DOI: 10.14569/IJACSA.2021.0120410.

SANTO, R.; PALMER, A.; KIM, B. **Vacant lots to vibrant plots: a review of the benefits and limitations of urban agriculture**. Baltimore: Johns Hopkins Center for a Livable Future, 2016.

WAHYUNI, S.; et al. **Implementation of IoT in smart agriculture: a review.** Journal of Agricultural Technology, v. 17, n. 3, p. 45–60, 2021.

ZHOU, L.; et al. **IoT-enabled agriculture: a review of current technologies and future directions.** Computers and Electronics in Agriculture, v. 170, p. 105–120, 2020.

BIOLCHINI, J.; MIAN, P. G.; NATALI, A. C. C.; TRAVASSOS, G. H. **Systematic Review in Software Engineering.** Technical Report ES 679/07. COPPE/UFRJ, 2007.

HIGGINS, J. P. T.; GREEN, S. (Ed.). **Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions.** Version 5.1.0. The Cochrane Collaboration, 2011.

LEVY, Y.; ELLIS, T. J. **A Systems Approach to Conduct an Effective Literature Review in Support of Information Systems Research.** Informing Science Journal, v. 9, p. 181–212, 2006.

4. CAPÍTULO II

MÍNIMO PRODUTO VIÁVEL: SOLUÇÃO DE MONITORAMENTO E CONTROLE DE PARÂMETROS AMBIENTAIS PARA O CULTIVO EM RESIDÊNCIAS

RESUMO

A integração entre a Internet das Coisas (IoT) e a agricultura de precisão tem transformado os sistemas produtivos ao permitir o monitoramento contínuo de variáveis ambientais por meio de sensores inteligentes. Essa convergência tecnológica viabiliza decisões automatizadas e sustentáveis, otimizando recursos como água, nutrientes e energia, especialmente em contextos urbanos e residenciais. Apesar dos avanços, observa-se uma lacuna significativa na literatura científica quanto à aplicação dessas tecnologias em pequenos cultivos domésticos, o que limita o desenvolvimento de soluções acessíveis e eficientes para a agricultura urbana. Com o objetivo de suprir essa lacuna, este projeto propõe o desenvolvimento e validação de um sistema inteligente baseado em IoT e inteligência artificial para o monitoramento do cultivo de alface crespa em residências. A metodologia adotada é aplicada, experimental e quantitativa, estruturada em etapas que envolvem desde o levantamento de requisitos até a construção e validação de um Produto Mínimo Viável (MVP), utilizando sensores físicos, plataforma em nuvem e princípios do ciclo de desenvolvimento de software. Após a realização dos experimentos e a análise dos dados obtidos, concluiu-se que o desenvolvimento do projeto foi bem-sucedido. Todos os objetivos específicos foram alcançados, incluindo o monitoramento automatizado de parâmetros ambientais e o armazenamento de dados em nuvem para geração de indicadores. Os resultados obtidos contribuem para a otimização do crescimento vegetativo do cultivo escolhido, promovendo práticas sustentáveis, uso eficiente de energia e baixo custo de implementação, alinhando-se aos princípios da agricultura urbana inteligente.

Palavras-chave: agricultura de precisão; MVP; IoT; cultivo em residências; arduino cloud

ABSTRACT

The integration between the Internet of Things (IoT) and precision agriculture has transformed production systems by enabling continuous monitoring of environmental variables through smart sensors. This technological convergence facilitates automated and sustainable decision-making, optimizing resources such as water, nutrients, and energy, especially in urban and residential contexts. Despite these advances, a significant gap remains in the scientific literature regarding the application of these technologies in small-scale domestic cultivation, which limits the development of accessible and efficient solutions for urban agriculture. To address this gap, this project proposes the development and validation of an intelligent system based on IoT and artificial intelligence for monitoring the cultivation of curly lettuce in residential settings. The adopted methodology is applied, experimental, and quantitative, structured in stages that include requirements gathering, construction, and validation of a Minimum Viable Product (MVP), using physical sensors, cloud-based platforms, and principles of the software development lifecycle. After conducting the experiments and analyzing the data collected, the project was deemed successful. All specific objectives were achieved, including automated monitoring of environmental parameters and cloud-based data storage for generating decision-making indicators. The results contribute to optimize the vegetative growth of the selected crop, promoting sustainable practices, efficient energy use, and low implementation costs, in alignment with the principles of smart urban agriculture.

Keywords: precision agriculture; MVP; IoT; residential cultivation; arduino cloud

4.1. Introdução

A integração entre a Internet das Coisas (IoT) e a agricultura de precisão tem revolucionado os sistemas de produção agrícola, permitindo o monitoramento contínuo de variáveis ambientais por meio de sensores instalados no solo, nas plantas ou no ambiente. Esses dispositivos coletam, em tempo real, dados como umidade do solo, temperatura, luminosidade, pH e crescimento das plantas, que são transmitidos para plataformas computacionais em nuvem e analisados por sistemas inteligentes.

Esse processo possibilita tomadas de decisão automatizadas ou assistidas, como o ajuste de sistemas de irrigação, correção de nutrientes ou alertas sobre condições adversas, contribuindo para a eficiência produtiva e redução de desperdícios (ALMEIDA *et al.*, 2020; SOUZA *et al.*, 2021).

Essa convergência tecnológica não apenas promove a otimização do uso de recursos naturais, como água e fertilizantes, mas também reduz custos operacionais e favorece práticas sustentáveis. Em contextos urbanos e residenciais, a adoção dessas soluções viabiliza o desenvolvimento de cultivos inteligentes que respondem automaticamente às condições do ambiente, proporcionando alimentos frescos, rastreáveis e de forma sustentável, além de fomentar a autossuficiência alimentar e a educação ambiental (MACHADO *et al.*, 2022; FERREIRA; PEREIRA, 2023).

Todavia, percebe-se que projetos com a aplicabilidade dessa integração no processo produtivo de pequenos cultivos em residências ainda são escassos na literatura científica, revelando uma lacuna importante no campo da agricultura de precisão, voltada ao ambiente doméstico. Essa ausência de abordagens voltadas ao contexto residencial limita o avanço de soluções tecnológicas sustentáveis e de baixo custo, que poderiam democratizar o acesso à produção de alimentos, promover autonomia, alimentar e estimular práticas agrícolas urbanas mais eficientes e inteligentes (SILVA *et al.*, 2023).

Como forma de fomentar essa convergência tecnológica, este projeto tem como propósito desenvolver uma solução computacional para o monitoramento e controle de parâmetros ambientais — como temperatura, umidade, pH (potencial hidrogeniônico), luminosidade e crescimento — de cultivos em ambientes residenciais. A proposta envolve o uso de sensores e componentes físicos integrados a uma plataforma em nuvem, baseada em internet das coisas (IoT), demonstrando, assim, a viabilidade da aplicação dessas tecnologias no cultivo doméstico.

Para viabilizar a proposta de cultivo doméstico com suporte tecnológico, adotou-se o processo metodológico experimental e quantitativa, com o objetivo de desenvolver e validar um protótipo funcional baseado em tecnologias de Internet das Coisas (IoT). Estudos como o de CHANCHI-GOLONDRINO *et al.* (2022) demonstram a eficácia da arquitetura IoT em cultivos urbanos, evidenciando o potencial dessas tecnologias para promover práticas agrícolas mais eficientes, sustentáveis e acessíveis mesmo em pequena escala.

A construção do projeto baseou-se nos princípios fundamentais do ciclo de desenvolvimento de software, que consiste em um conjunto estruturado de fases destinadas a orientar a criação, evolução e manutenção de sistemas computacionais. Esse ciclo geralmente inclui etapas como levantamento de requisitos, análise, projeto, implementação, testes, implantação e manutenção, proporcionando uma abordagem sistemática e disciplinada para o desenvolvimento de software (SOMMERVILLE, 2011).

A alface crespa foi o cultivo selecionado para a construção do MVP. A alface crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*) é uma das variedades mais populares de alface cultivadas no Brasil e no mundo, especialmente em hortas residenciais e sistemas hidropônicos.

4.1.1. Agricultura vertical no mundo

A agricultura vertical urbana tem se tornado uma solução crescente em várias partes do mundo, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Alguns dos países mais notáveis estão listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Agricultura vertical nos principais países do mundo.

País	Contexto	Fonte
Estados Unidos	O mercado de agricultura vertical foi avaliado em aproximadamente US\$ 4,8 bilhões em 2024, com projeção de alcançar US\$ 7,8 bilhões até 2033, crescendo a taxa composta anual de 10,3% entre 2024 e 2033.	[1]
Cingapura	Destaca-se por sua política “30 by 30”, que tem como meta produzir 30% das necessidades nutricionais localmente, até 2030. Para isso, foi criado um fundo de SGD 60 milhões (cerca de USD 43 milhões) em apoio à expansão da agrotecnologia local (KR Asia e Channel News Asia).	[2]

Países Baixos (Holanda)	A Holanda é o segundo maior exportador agrícola do mundo em valor, liderando em tecnologias como agricultura vertical e automação.	[3]
Emirados Árabes Unidos (EAU)	Os EAU são líderes regionais em adoção de fazendas verticais, num mercado projetado para atingir entre US\$ 12,96 bilhões (2023), até US\$ 61,8 bilhões (2030), dependendo da fonte. O crescimento regional é impulsionado por escassez de recursos hídricos e segurança alimentar.	[4]
Japão	Um dos pioneiros na verticalização agrícola. Em 2024, o mercado japonês foi estimado em US\$ 475,1 milhões, com previsão de crescimento para US\$ 1,418 bilhões, até 2030, CAGR de 20,4%.	[5]
Reino Unido	O mercado britânico está projetado com uma CAGR de 24,02%, entre 2023 e 2033 — um dos ritmos mais altos na Europa.	[6]
Canadá	Estimativas variam: segundo um estudo o mercado canadense de agricultura indoor foi de USD 2,952 milhões (2023) com crescimento para US\$ 7,789 milhões, até 2030 (CAGR ~14,9%). Outra fonte indica US\$ 1,20 bilhões em 2025, crescendo para US\$ 2 bilhões, até 2030 (CAGR ~9,8%).	[7]

Fontes:

[1] Estados Unidos – GlobeNewswire (2024);

[2] Cingapura – SFA (2024); KrASIA (2024); CNA (2024);

[3] Países Baixos – The Washington Post (2022); MFAT (2023);

[4] Emirados Árabes Unidos – Virtue Market Research (2024); Data Bridge Market Research (2024);

[5] Japão – Grand View Research (2024);

[6] Reino Unido – Spherical Insights (2024); Market Data Forecast (2024);

[7] Canadá – Grand View Research (2024); Mordor Intelligence (2024).

4.1.2. Agricultura vertical no Brasil

A agricultura vertical no Brasil ainda está em estágio inicial quando comparada a países líderes como Japão, Estados Unidos e Holanda, que possuem longa tradição e avanços tecnológicos significativos na área (DESPOMMIER, 2010; AL-KODMANY, 2018). Entretanto, a prática vem crescendo em grandes centros urbanos brasileiros, como São Paulo, Rio de Janeiro e Curitiba, impulsionada por *startups*, iniciativas privadas e projetos acadêmicos que desenvolvem sistemas de cultivo em camadas, estufas automatizadas e fazendas urbanas indoor (SILVA et al., 2021; SOUZA & PEREIRA, 2022). Esses esforços buscam atender à

demanda por alimentos frescos e sustentáveis em áreas urbanas densamente povoadas, além de promover a inovação tecnológica no setor agrícola brasileiro (COSTA et al., 2023).

De acordo com estudo da Embrapa (2023), o mercado de agricultura vertical no Brasil apresentou crescimento de 45% nos últimos três anos, movimentando atualmente mais de R\$ 500 milhões anualmente. Complementarmente, pesquisa realizada pela Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2023) indica que cerca de 85% das grandes cidades brasileiras possuem potencial para implementar projetos de agricultura vertical, com capacidade estimada para suprir até 30% da demanda local por hortaliças. Esses dados evidenciam o crescimento significativo e a relevância estratégica da agricultura vertical para a segurança alimentar e sustentabilidade urbana no país (EMBRAPA, 2023; FGV, 2023).

Apesar do cenário promissor, a consolidação da agricultura vertical urbana no Brasil ainda enfrenta desafios significativos, entre os quais destacam-se:

1. Elevado custo inicial de implementação: a adoção de sistemas de agricultura vertical exige investimentos substanciais em infraestrutura, equipamentos especializados e tecnologias avançadas, o que pode limitar a disseminação, especialmente em comunidades de baixa renda ou em iniciativas públicas com orçamento restrito.
2. Necessidade de capacitação técnica e conhecimento multidisciplinar: a operação eficiente desses sistemas demanda profissionais qualificados em áreas como agronomia, engenharia, automação e tecnologia da informação. A escassez de mão de obra especializada pode dificultar a manutenção e expansão das iniciativas.
3. Aceitação pelo consumidor e pelo mercado: por se tratar de uma prática ainda pouco difundida, muitos consumidores desconhecem os benefícios da agricultura vertical, podendo apresentar resistência quanto à qualidade, sabor e preço dos produtos cultivados nesses sistemas. A construção de confiança e a educação do consumidor são, portanto, aspectos essenciais para o fortalecimento do setor.

A Tabela 6, lista as principais cidades no Brasil que possuem iniciativas e projetos que atualmente estão sendo desenvolvidos no contexto da agricultura urbana.

Tabela 5 - Agricultura vertical nas principais cidades no Brasil

Cidade	Iniciativas e Contexto	Exemplos/Projetos	Fonte
São Paulo (SP)	Iniciativas comunitárias e sociais utilizando técnicas de cultivo vertical e aeroponia em favelas e centros urbanos.	Agro Favela Refazenda (Paraisópolis).	[1]
Rio de Janeiro (RJ)	Projetos voltados à segurança alimentar em áreas de vulnerabilidade, com foco em agricultura urbana e hortas verticais.	Hortas comunitárias em comunidades urbanas.	[2]
Belo Horizonte (MG)	Incentivo à agricultura urbana com elementos de cultivo vertical em programas de segurança alimentar e políticas públicas de apoio.	Programas da Prefeitura Municipal de BH.	[3]
Curitiba (PR)	Políticas ambientais ativas que promovem hortas urbanas e verticais como parte de ações de educação ambiental e sustentabilidade.	Programa Municipal de Agricultura Urbana (PMAU).	[4]
Porto Alegre (RS)	Projetos comunitários e privados em expansão, utilizando espaços urbanos ociosos para o cultivo vertical de alimentos.	Iniciativas locais de revitalização urbana.	[5]
Recife (PE)	Crescente adoção de hortas verticais em escolas, condomínios e comunidades como alternativa à escassez de espaço urbano.	Projetos em escolas públicas e associações de bairro.	[6]
Brasília (DF)	Incentivo à agricultura urbana vertical em áreas públicas e residenciais, com apoio a tecnologias sustentáveis e capacitação.	Hortas em escolas e comunidades urbanas.	[7]

Fontes:

- [1] G10 Favelas; Instituto Stop Hunger Brasil (2024) – São Paulo;
 [2] Prefeitura do Rio de Janeiro – Programa Hortas Cariocas (2024);
 [3] SMASAC – Prefeitura de Belo Horizonte (2024);
 [4] Secretaria Municipal de Segurança Alimentar – Curitiba (2024);
 [5] UFRGS – Mapeamento de iniciativas de agricultura urbana (2023);
 [6] SEAU – Prefeitura do Recife (2024);
 [7] Embrapa; Governo do Distrito Federal – Brasília (2024).

4.1.3. Produção de alimentos em residências

A produção de alimentos em ambientes residenciais consiste na prática de cultivar, criar ou produzir alimentos diretamente em espaços domésticos, como quintais, varandas, jardins verticais, e até mesmo ambientes internos de apartamentos. Essa abordagem ganhou destaque, especialmente em centros urbanos, impulsionada pelo crescente interesse por práticas sustentáveis, segurança alimentar, redução da dependência de alimentos industrializados e melhoria na qualidade de vida. Além disso, promove a autonomia alimentar das famílias, contribuindo para hábitos alimentares mais saudáveis e para o reaproveitamento de espaços urbanos subutilizados (Embrapa Hortaliças⁵, 2012; KATO *et al.*, 2021; FAO, 2019).

Um dos exemplos mais comuns é o cultivo de hortas caseiras, como alface, tomate, rúcula, cenoura, ervas aromáticas (manjeriço, alecrim), entre outras. Esse tipo de produção pode ser feito em pequenos espaços, como vasos, jardineiras ou até mesmo em sistemas verticais (EPAMIG⁶, 2020). Em ambientes urbanos, a produção de alimentos pode ser facilitada por sistemas hidropônicos, aeropônicos ou agricultura vertical, que são soluções que permitem o cultivo sem o uso de solo, otimizando o uso do espaço e recursos como água e nutrientes.

A produção de alimentos em residências tem como principal objetivo promover a autossuficiência alimentar, permitindo que os próprios moradores cultivem parte ou a totalidade dos alimentos consumidos no ambiente doméstico. Essa prática contribui para a redução da dependência de cadeias convencionais de abastecimento, como supermercados, e assegura maior controle sobre os métodos de cultivo e a qualidade dos alimentos produzidos (EMBRAPA Hortaliças, 2012; Santos *et al.*, 2020).

Além disso, o cultivo doméstico de alimentos pode gerar benefícios ambientais, econômicos e sociais. Entre os aspectos ambientais, destaca-se a diminuição da pegada de carbono, uma vez que reduz a necessidade de transporte e embalagem dos produtos alimentícios. No aspecto econômico, a produção caseira possibilita economia nos gastos com a aquisição de hortaliças e outros vegetais, especialmente em tempos de inflação ou escassez de produtos frescos. Socialmente, fortalece a segurança alimentar e promove hábitos de vida

⁵ <https://www.embrapa.br/hortalicas>

⁶ <https://www.epamig.br/>

mais saudáveis, incentivando o consumo de alimentos frescos e livres de agrotóxicos (SILVA & OLIVEIRA, 2021; FGV Agro⁷, 2023).

4.1.4. Aspectos Sociais

O cultivo de alimentos em residências, especialmente em áreas urbanas, tem se consolidado como uma prática socialmente relevante, promovendo não apenas a segurança e a autossuficiência alimentar, mas também a coesão comunitária, a educação ambiental e a melhoria da qualidade de vida. Essa prática fortalece o vínculo dos indivíduos com a alimentação saudável, possibilita o reaproveitamento de espaços urbanos ociosos e incentiva o compartilhamento de conhecimentos entre vizinhos, familiares e comunidades locais (SILVA & OLIVEIRA, 2021; SANTOS *et al.*, 2020).

Nesse sentido, o cultivo doméstico pode ser importante ferramenta de inclusão social, especialmente em comunidades de baixa renda, ao oferecer alternativas sustentáveis de geração de renda e complementar a alimentação familiar com produtos frescos e livres de agrotóxicos. As hortas urbanas, nesse contexto, também têm sido utilizadas como espaços terapêuticos e de reabilitação social, promovendo bem-estar físico e mental, especialmente entre idosos, crianças e pessoas em situação de vulnerabilidade (PEREIRA *et al.*, 2021; EMBRAPA, 2020).

Segundo dados da Embrapa (2023), a produção urbana de alimentos tem potencial para suprir até 20% das necessidades alimentares das famílias de baixa renda em centros urbanos, contribuindo também para o combate ao desperdício e para o aproveitamento de espaços ociosos. Ainda de acordo com o IBGE (2022), aproximadamente 10% das famílias brasileiras urbanas cultivam algum tipo de alimento em casa, com maior concentração nas regiões Sudeste e Sul.

Em países como o Brasil, marcados por profundas desigualdades sociais e econômicas, a produção de alimentos em residências configura-se como uma estratégia eficaz para combater a insegurança alimentar, especialmente nas periferias urbanas. Nessas regiões, o acesso a alimentos frescos, saudáveis e livres de agrotóxicos é frequentemente limitado devido a fatores como o alto custo dos produtos, a escassez de feiras ou mercados locais e a precariedade do transporte público.

⁷ <https://agro.fgv.br/>

Diante desse cenário, cultivar alimentos em casa — seja em hortas no quintal, em vasos, varandas ou até mesmo em hortas verticais — permite aos moradores reduzir os gastos com alimentação, melhorar a qualidade nutricional de suas dietas e ter maior controle sobre a procedência dos alimentos consumidos.

4.1.5. Aspectos Econômicos

Em um cenário marcado por crises econômicas, insegurança alimentar e crescimento urbano acelerado, a produção de alimentos em residências ganha relevância como alternativa viável para promover a autossuficiência alimentar, reduzir despesas domésticas e até gerar renda suplementar para famílias em contextos urbanos e periféricos (FAO⁸, 2021; IBGE⁹, 2022).

Um dos principais impactos econômicos da produção doméstica de alimentos é a redução direta nos gastos com a compra de hortaliças, temperos e, em alguns casos, frutas e legumes. Estimativas indicam que famílias com hortas caseiras podem economizar até 30% em sua cesta básica mensal, dependendo da variedade e da escala do cultivo (EMBRAPA Hortaliças, 2020). Essa economia é particularmente significativa em regiões em que os preços de alimentos frescos são elevados ou em "desertos alimentares", locais com difícil acesso a produtos saudáveis e acessíveis.

Além da economia doméstica, a produção alimentar residencial pode funcionar como complemento de renda. Em diversas cidades brasileiras, pequenos produtores urbanos vendem o excedente de suas hortas em feiras locais ou por meio de redes de consumo consciente, como cestas agroecológicas e grupos de compras coletivas, gerando impacto positivo na economia local e fortalecendo cadeias curtas de comercialização (SILVA *et al.*, 2021).

4.1.6. Aspectos de Sustentabilidade

A produção de alimentos em residências está diretamente conectada aos princípios de sustentabilidade, pois promove práticas que buscam minimizar o impacto ambiental, otimizar o uso de recursos naturais e promover a autossuficiência alimentar de forma responsável. No contexto atual, em que questões como o desperdício de alimentos, escassez de recursos naturais

⁸ <https://www.fao.org/>

⁹ <https://www.ibge.gov.br/>

e mudanças climáticas estão em destaque, a produção de alimentos em casa oferece uma alternativa prática para reduzir a pegada ambiental e contribuir para a sustentabilidade nas cidades (BEZERRA JÚNIOR, L. A., *et al.* (2024).

Outro aspecto importante, consiste na redução da pegada de carbono associada à cadeia alimentar tradicional. Cultivar alimentos localmente, sobretudo em áreas urbanas, elimina ou reduz drasticamente etapas como transporte, refrigeração, embalagem e armazenamento, que representam fontes significativas de emissões de gases de efeito estufa (GEE). De acordo com CONTERATO, GAZOLLA e SANTOS (2024), cadeias curtas de abastecimento — como a produção residencial — apresentam menor emissão de carbono nos processos logísticos (“*food miles*”) do que cadeias médias e longas, reforçando o papel estratégico da produção local na mitigação das mudanças climáticas.

Desta forma, a produção caseira de alimentos permite o uso racional de recursos como água e energia, principalmente quando associada a práticas sustentáveis, como irrigação controlada e compostagem. Segundo a FAO (2019), sistemas alimentares urbanos sustentáveis que incluem hortas domésticas podem reduzir até 60% das emissões de CO₂ equivalentes relacionadas à produção e distribuição de hortaliças convencionais. A adoção dessas práticas também contribui para o fortalecimento da resiliência alimentar das cidades, promovendo sistemas mais autônomos, eficientes e menos dependentes de combustíveis fósseis.

A produção de alimentos em ambientes residenciais tem o potencial de transformar os hábitos de consumo das famílias e das comunidades. Indivíduos que cultivam seus próprios alimentos tendem a desenvolver maior consciência sobre a origem dos produtos que consomem, o que estimula o interesse por práticas agrícolas sustentáveis e pelo consumo de alimentos frescos e orgânicos. Segundo FERREIRA e PEREIRA (2022), iniciativas como hortas urbanas e domésticas não apenas promovem a sustentabilidade, mas também contribuem para a educação alimentar e o fortalecimento da autonomia das famílias em relação à sua alimentação.

4.1.7. Plataforma de Desenvolvimento Arduino

A IDE do Arduino (*Arduino Integrated Development Environment*) é uma plataforma de desenvolvimento de código aberto, amplamente utilizada para programar microcontroladores da família Arduino e compatíveis, como o ESP32 utilizado neste trabalho (ARDUINO, 2025). Essa ferramenta é reconhecida por sua simplicidade, acessibilidade e

eficiente integração com hardware, características que a tornam particularmente valiosa para projetos acadêmicos e prototipagem rápida (MONK, 2018).

Segundo a documentação oficial (ARDUINO, 2025), a IDE Arduino oferece suporte nativo a diversas placas de desenvolvimento, incluindo a família ESP32, através da instalação de pacotes específicos. Além disso, conta com uma comunidade ativa de desenvolvedores e pesquisadores, que colaboram através de fóruns especializados e repositórios de código aberto, facilitando a solução de problemas técnicos e o compartilhamento de conhecimento (MONK, 2018). A Tabela 7, lista as principais características do Arduino que foram utilizadas no projeto.

Tabela 6 - Resumo das características da plataforma Arduino.

Característica	Descrição
Código aberto (open source)	Disponível gratuitamente e com código-fonte aberto, permitindo modificações.
Interface intuitiva	Voltada para iniciantes, com estrutura simples e comandos claros.
Linguagem baseada em C/C++	Programação em uma versão simplificada de C++, com bibliotecas específicas.
Compilador e Upload integrados	Compila e envia o código diretamente para a placa via USB ou Wi-Fi.
Bibliotecas e suporte comunitário	Diversas bibliotecas prontas grátis para sensores, atuadores e conectividade.
Compatibilidade com múltiplos hardwares	Suporta Arduino, ESP32, ESP8266, entre outros microcontroladores.

Fonte: Autor (2025).

A versão utilizada da IDE do Arduino foi a 2.3.3, lançada em 2024, que faz parte da nova geração da Arduino IDE 2.x, que substitui a antiga IDE clássica (versão 1.x). Ela trouxe melhorias importantes tanto na interface quanto na funcionalidade, com foco em oferecer uma experiência mais moderna, estável e produtiva para desenvolvedores com uma interface moderna e responsiva.

Ela possuiu editor de código mais avançado, autocompletar com sugestões de comandos, variáveis e funções, integração com o sistema de depuração para suporte a debug

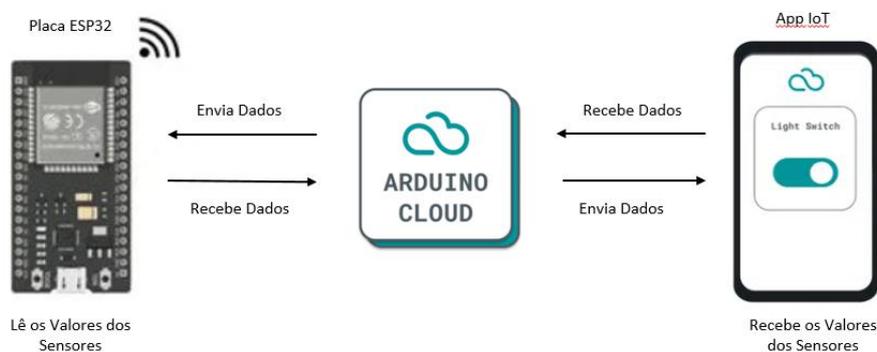
com breakpoints, gerenciador de placas e bibliotecas aprimorado, além de permite instalar múltiplas versões de placas/bibliotecas e console serial integrado

4.1.8. Plataforma de IoT Arduino Cloud

A Arduino Cloud¹⁰ é uma plataforma baseada em nuvem (*cloud-based*) que oferece suporte ao desenvolvimento de aplicações IoT por meio da integração de dispositivos físicos (como o ESP32 e placas Arduino) com *dashboards* interativos, em que é possível visualizar e controlar variáveis em tempo real pela internet. O sistema permite ainda o armazenamento e a análise histórica de dados coletados por sensores.

A Figura 2, ilustra o fluxo de comunicação entre os componentes principais de uma solução IoT baseada em Arduino Cloud, destacando a interação entre a placa ESP32, a plataforma Arduino Cloud e um aplicativo móvel (App IoT). Essa arquitetura representa um ciclo completo de monitoramento e controle remoto, essencial para soluções de agricultura inteligente baseadas em IoT.

Figura 2 - Fluxo de dados entre ambiente físico e IoT.



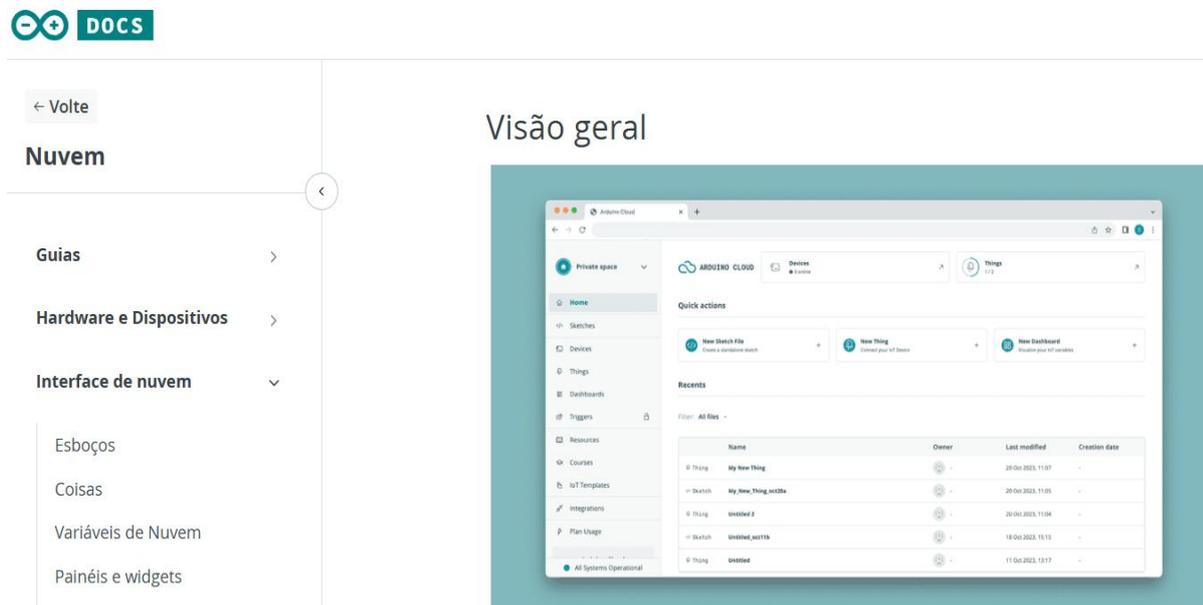
Fonte Autor (2025).

A Figura 3, apresenta a interface principal da plataforma Arduino Cloud, especificamente na seção de “Visão Geral” (*Overview*). Trata-se de um ambiente em nuvem voltado ao desenvolvimento e gerenciamento de soluções de internet das coisas (IoT), acessível por navegador web. Essa interface permite ao desenvolvedor gerenciar todo o ecossistema IoT da solução, desde a programação de dispositivos ESP32 até a visualização de dados em tempo

¹⁰ <https://docs.arduino.cc/software/ide>

real, facilitando a criação de projetos de monitoramento e automação como o proposto em seu MVP.

Figura 3 – Visão Geral da Plataforma Arduino Cloud.



Fonte: (Arduino,2025).

A barra de guias fica do lado esquerdo da plataforma e permite de forma intuitiva acessar qualquer funcionalidade do ambiente IoT para ser utilizado. Nesse projeto foram utilizadas as seguintes funcionalidades:

1. Esboços (*sketch*): na plataforma Arduino Cloud, o conceito de "*sketch*" refere-se ao programa ou código-fonte que você escreve para controlar um microcontrolador, como o ESP32.
2. Coisas (*things*) - o conceito de "*things*" (em português, "coisas") é central para o funcionamento da Internet das Coisas (IoT). Uma *thing* representa um dispositivo conectado como um ESP32.
3. Painéis (widgets)- o conceito de *widgets* está diretamente ligado aos *dashboards* — que são os painéis visuais que você pode monitorar e controlar as *Things* (dispositivos conectados à nuvem).
4. Variáveis de Nuvem (*device*) - conceito de *device* (em português, dispositivo) refere-se ao hardware físico, como uma placa Arduino, ESP32 que será conectado à nuvem para executar tarefas e trocar dados em tempo real a partir de variáveis predefinidas.

4.1.9. Cultivo escolhido

Foram realizados estudos comparativos com três cultivos — rúcula, espinafre e alface — a fim de identificar qual apresentaria melhor viabilidade para o desenvolvimento da pesquisa. A escolha considerou como fator decisivo o tempo, uma vez que o período total disponível para a execução do experimento estava diretamente relacionado ao cronograma do mestrado. Para essa análise, foram observados e registrados os seguintes parâmetros: tempo da sementeira, tempo de germinação, desenvolvimento das folhas e tempo de colheita. Esses critérios permitiram uma avaliação objetiva da adequação de cada cultivo ao planejamento experimental, Tabela 8.

Tabela 7 - Cultivos analisados na pesquisa.

Cultivo	Local da Semeadura	Germinação	Desenvolvimento das Folhas	Colheita
Espinafre	Semeado diretamente no solo ou em bandejas de mudas. Profundidade de 1,5 cm.	Geralmente germinam em 5 a 10 dias.	As folhas começam a desenvolver-se em 2 a 3 semanas, após a germinação.	Pronto para a colheita a cerca de 6 a 8 semanas, após o plantio.
Rúcula	Semeadas diretamente no solo ou em bandejas de mudas. Profundidade de 1,5 a 2 cm.	Geralmente germinam em 4 a 7 dias.	As folhas começam a desenvolver-se em 1 a 2 semanas, após a germinação.	Pronta para a colheita a cerca de 30 a 40 dias, após o plantio.
Alface	Podem ser semeadas diretamente no solo ou em bandejas de mudas.	As sementes de alface geralmente germinam em 7 a 14 dias.	As folhas começam a desenvolver-se em 2 a 3 semanas, após a germinação.	Pronta para a colheita a cerca de 30 a 45 dias, após o plantio.

Fonte (Embrapa, 2025)

A alface crespa (*Lactuca sativa* var. *crispa*) foi o cultivo selecionado para a construção do MVP. Essa folhosa é uma das variedades mais cultivadas no Brasil e no mundo, especialmente em hortas residenciais e sistemas hidropônicos. Sua ampla aceitação está

associada ao sabor suave, à textura crocante e à facilidade de cultivo, características que a tornam ideal para experimentos de agricultura de precisão em pequena escala. Além disso, por ser sensível a variações de temperatura, umidade e luminosidade, a alface crespa é uma excelente escolha para testar a eficiência de sistemas IoT no monitoramento e controle de parâmetros ambientais, contribuindo para a obtenção de dados relevantes para o aprimoramento do protótipo desenvolvido (SUINAGA *et al.*, 2013).

4.1.10. Método hidropônico escolhido

A técnica hidropônica escolhida foi o método Kratky. Esse método foi desenvolvido pelo pesquisador Bernard Kratky da Universidade do Havaí, é uma técnica passiva que dispensa o uso de bombas ou circulação de água, caracterizando-se pela simplicidade, baixo custo e eficiência, o que o torna ideal para o cultivo de alface crespa e outras hortaliças folhosas, sendo amplamente utilizado em pesquisas agrícolas (KRATKY, 2009).

Seu funcionamento baseia-se em um sistema estático, em que a planta cresce em um recipiente contendo solução nutritiva que não é reabastecida durante todo o ciclo. Inicialmente, as raízes permanecem submersas na solução, absorvendo nutrientes na chamada zona úmida. Conforme a planta consome a solução, o nível do líquido diminui, formando uma zona de ar que permite que as raízes aéreas absorvam oxigênio, evitando a asfixia radicular. A Figura 4, apresenta o fluxo do método Kratky, conforme ilustrado na figura, pode ser descrito da seguinte forma:

1. No primeiro dia, a muda de alface, com cerca de 15 dias, é posicionada em um recipiente com solução nutritiva (água + nutrientes), em que as raízes estão totalmente submersas, permitindo a absorção inicial dos nutrientes e do oxigênio dissolvido na água. O recipiente está fechado com uma tampa (lid) que ajuda a conservar o ambiente interno.
2. Próximo do 16º dia, à medida que a planta cresce e consome a solução nutritiva, o nível da solução começa a diminuir, expondo parte das raízes ao ar. Essa exposição cria uma zona aérea dentro do recipiente, permitindo que as raízes aéreas absorvam oxigênio diretamente do ar, evitando a asfixia radicular e mantendo o equilíbrio entre nutrição e respiração das raízes.

3. No 30º dia, a planta está mais desenvolvida e grande parte das raízes está exposta ao ar ou oxigênio, enquanto uma menor quantidade de raízes permanece submersa na solução nutritiva remanescente. Esse sistema estático e passivo permite o crescimento saudável da planta, sem a necessidade de circulação ou reposição da solução durante o ciclo completo.

Figura 3 - Processo de crescimento do cultivo com método Kratky.



Fonte (Internet, 2025).

4.2. Material e Método

4.2.1. Pesquisa Experimental

A pesquisa experimental é um método científico que visa estabelecer relações de causa e efeito entre variáveis, por meio da manipulação controlada de condições e da observação sistemática dos resultados. Essa abordagem permite isolar e testar hipóteses, avaliando de forma objetiva os efeitos de variáveis independentes sobre variáveis dependentes em um ambiente controlado (MARCONI & LAKATOS, 2017). No presente estudo, esse método foi fundamental para validar a eficácia do protótipo de monitoramento ambiental desenvolvido, verificando seu impacto direto sobre o crescimento do cultivo da folhosa utilizada no projeto.

Variáveis Independentes

As variáveis independentes (VI) referem-se aos fatores manipuláveis ou controláveis em um experimento, cuja alteração visa observar os efeitos sobre as variáveis dependentes (VD), que representam as respostas ou resultados mensuráveis do sistema (CRESWELL, 2014; KERLINGER, 1980). No contexto deste projeto de pesquisa, as VI

correspondem aos parâmetros ambientais monitorados pela solução, como temperatura, umidade, luminosidade, pH da solução nutritiva e taxa de crescimento (LI *et al.*, 2017). Essas variáveis são fundamentais para estabelecer condições controladas no cultivo escolhido, possibilitando a análise da influência de cada fator no desenvolvimento vegetal (TAIZ *et al.*, 2017).

Variáveis Dependentes (VD)

As variáveis dependentes (VD) correspondem aos resultados observáveis que sofrem influência direta das variáveis independentes (VI) e são fundamentais para a análise de desempenho de um sistema experimental. Em projetos que envolvem automação e Internet das Coisas (IoT) aplicadas à agricultura de precisão, como o cultivo doméstico de alface (*Lactuca sativa*), as VD representam os indicadores de performance da solução desenvolvida, incluindo o crescimento da planta, estabilidade da comunicação entre sensores, precisão das medições ambientais e eficiência no controle automatizado.

Esses indicadores são impactados por fatores ambientais monitorados — como temperatura, umidade, pH, luminosidade e qualidade da água — e refletem o grau de integração entre os componentes físicos (sensores e microcontroladores) e a plataforma de IoT empregada (SOUZA *et al.*, 2021; ZHANG *et al.*, 2021). A Tabela 9, lista as variáveis dependentes utilizadas neste trabalho.

Tabela 8 - Lista de variáveis dependentes.

Variável Dependente	Método de Medição	Por que é importante?
Intensidade Luminosa	Mede a variação da resistência do sensor de luminosidade	É calculado a intensidade luminosa das fitas de LED para potencializar o processo de?
Taxa de Crescimento Diário	Calcular a diferença entre o posicionamento do sensor e o crescimento da folhagem	Monitorar a taxa de crescimento diário do cultivo realizado.
Temperatura do Ambiente	Verifica se a temperatura ambiente está adequada	Acionar o ventilador para manter a temperatura ambiente menor do que 25°C.

Variável Dependente	Método de Medição	Por que é importante?
PH da Solução Nutritiva	Verificar se a solução nutritiva está ácida (pH < 5,5) ou alcalina (pH > 7,5), pois indicam a redução da disponibilidade de nutrientes.	Corrigir o PH da solução e evitar a redução da absorção de nutrientes pela solução.
Horas de Iluminação com LED	Monitorar o tempo de incidência luminosa sobre a cultura.	Evitar a incidência luminosa em excesso sobre a cultura que está sendo cultivada.

Fonte: Autor.

Variáveis de Controle (fixadas)

No contexto do projeto de monitoramento e controle ambiental para o cultivo sustentável em residência utilizando Internet das Coisas (IoT), as variáveis de controle são os elementos ou fatores que se mantêm constantes ou são ajustados deliberadamente para garantir que os efeitos observados sobre as variáveis dependentes (VD) possam ser atribuídos com maior precisão às variáveis independentes (VI).

Essas variáveis desempenham papel fundamental na confiabilidade e validade interna dos resultados experimentais, pois ajudam a reduzir o viés e a eliminar possíveis interferências externas (CRESWELL, 2014; KERLINGER, 1980). A Tabela 8, lista as variáveis utilizadas no projeto, com o descritivo da sua respectiva finalidade e como pode ser utilizada para controlar o experimento.

Tabela 9 - Variáveis fixas.

Variável	Finalidade	Como Controlar no Experimento
Espécie/Cultivar	Diferentes cultivares têm taxas de crescimento distintas.	Foi utilizado o cultivo da alface com mudas de aproximadamente até 15 dias.
Substrato/Solução Nutritiva	A composição do meio afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes.	Solução nutritiva padrão para hidropônica.

Variável	Finalidade	Como Controlar no Experimento
Fotoperíodo	A alface crespa requer fotoperíodo específico para evitar floração precoce.	Manter 12–16h de luz Controle automático do período da Intensidade luminosa sobre o cultivo.
Fonte de Luz	Espectro e intensidade que influenciam a fotossíntese.	Usar luz branca fria (6500K) ou LEDs com PPFd de 200–400 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$.
Distância fixa do sensor de crescimento	Conseguir medir com precisão a taxa de Crescimento do cultivo.	Fixar o sensor que mede o crescimento da planta em direção vertical em linha reta, formando um ângulo de 180 graus.
Local do Cultivo	Não interferir nos resultados do experimento.	Não ficar mudando a solução de lugar.

Fonte: Autor (2025).

4.2.2. Pesquisa Quantitativa

A presente pesquisa também aplicou uma abordagem quantitativa, que se caracteriza pelo uso de dados numéricos mensuráveis, coletados sistematicamente com o objetivo de identificar padrões, relações e efeitos causais entre as variáveis ambientais monitoradas e o desenvolvimento do cultivo. Essa metodologia permitiu uma análise precisa e objetiva dos parâmetros ambientais, fundamentais para avaliar o desempenho do cultivo em um ambiente controlado e automatizado, conforme proposto no sistema de monitoramento baseado em internet das coisas (IoT) (Gil, 2019; LAKATOS & MARCONI, 2021).

Coleta dos Dados

A obtenção dos dados foi realizada por meio de sensores integrados a um microcontrolador ESP32, com conexão via Wi-Fi a uma plataforma em nuvem, Arduino Cloud. Os sensores utilizados foram responsáveis pelo monitoramento contínuo de variáveis

ambientais críticas: temperatura do ar (°C), umidade relativa (%), pH da solução nutritiva, intensidade luminosa (lux), temperatura da água (°C) e, adicionalmente, o crescimento das plantas (cm), obtido por sensores de distância do tipo LiDAR. Esses dados foram coletados em intervalos programados, garantindo confiabilidade e precisão, como recomendado por Zhang *et al.* (2021) no contexto da agricultura inteligente.

O repositório utilizado para armazenar os dados coletados no projeto foi o ambiente Google Planilha. Google Planilhas (*Google Sheets*) é uma aplicação baseada em nuvem desenvolvida pela Google, que permite criar, editar e compartilhar planilhas eletrônicas online, de forma colaborativa e em tempo real. É parte do conjunto de ferramentas do *Google Workspace*, integrando-se com outros aplicativos como *Google Docs*, *Google Drive* e *Google Forms*, (Google, 2004).

A Planilha Google, foi escolhida por ser uma plataforma em nuvem possível ser acessada e compartilhada de forma muito prática em que as informações são salvas automaticamente no Google Drive, acessíveis de qualquer lugar, colaboração em tempo real, podendo ser editadas simultaneamente, com comentários e sugestões, funções avançadas, suporta fórmulas, gráficos, tabelas dinâmicas, validação de dados, entre outros e possibilita criar scripts personalizados e automações. A Tabela 11, traz uma amostra da coleta de dados realizadas no projeto.

Perceba que na Tabela 11, tem o registro em tempo real da data e horário da coleta dos dados, além dos parâmetros coletados como temperatura ambiente em centígrados, o percentual da umidade ambiente, além do Ph da solução e da taxa de crescimento do cultivo.

Tabela 10 - Planilha Google com dados coletados.

Data	Horário da leitura de dados	Luminosidade (0 - 4095)	Temperatura Ambiente (°C)	Umidade (%)	Temperatura da solução (°C)	pH da solução (0 - 14)	Distância (mm)
16/04/2025	23:23:36	4095	24.00	37.00	24.37	6.98	379.00
16/04/2025	23:23:45	4095	25.00	36.00	24.44	7.41	376.00
16/04/2025	23:23:53	4095	26.00	36.00	24.37	7.28	381.00
16/04/2025	23:24:04	4095	24.00	39.00	24.37	7.37	374.00
16/04/2025	23:24:13	4095	25.00	37.00	24.44	7.34	378.00
16/04/2025	23:24:39	4095	24.00	37.00	24.31	7.51	386.00
16/04/2025	23:24:47	4095	25.00	38.00	24.37	6.99	379.00
16/04/2025	23:24:57	4095	24.00	39.00	24.37	7.15	371.00
16/04/2025	23:25:05	4095	24.00	38.00	24.44	7.41	372.00
16/04/2025	23:25:13	4095	24.00	38.00	24.44	7.25	378.00
16/04/2025	23:25:21	4095	25.00	37.00	24.37	6.96	384.00
16/04/2025	23:25:32	4095	25.00	37.00	24.37	7.57	376.00

16/04/2025	23:25:42	4095	24.00	37.00	24.37	7.20	379.00
16/04/2025	23:25:54	4095	24.00	38.00	24.37	7.22	373.00
16/04/2025	23:26:03	4095	24.00	37.00	24.37	7.29	374.00
16/04/2025	23:26:21	4095	25.00	38.00	24.37	7.20	374.00
16/04/2025	23:26:35	4095	25.00	37.00	24.37	7.26	373.00
16/04/2025	23:26:45	4095	25.00	37.00	24.37	7.25	378.00
16/04/2025	23:26:53	4095	25.00	38.00	24.37	7.31	380.00
16/04/2025	23:27:02	4095	24.00	39.00	24.44	7.42	378.00
16/04/2025	23:27:11	4095	25.00	37.00	24.37	7.58	380.00
16/04/2025	23:27:19	4095	25.00	37.00	24.31	7.59	381.00

Fonte: Autor (2025)

Integração entre ESP32 x Google Sheet

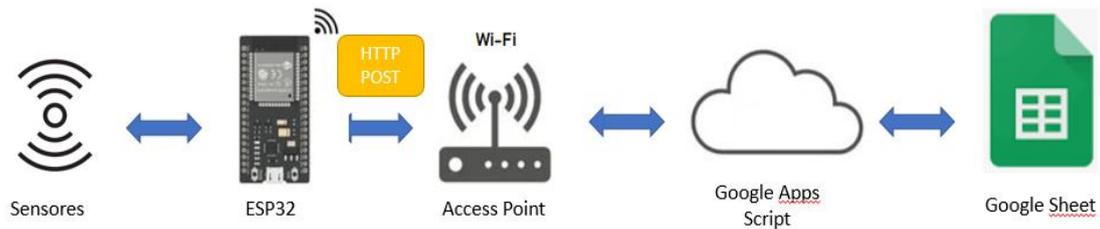
A integração entre o microcontrolador ESP32 e o Google Sheets permitiu o armazenamento em nuvem dos dados coletados por sensores ambientais de forma automatizada, segura e acessível. Essa comunicação viabilizou o envio periódico das medições – como temperatura, umidade, pH, luminosidade e crescimento do cultivo – diretamente para uma planilha eletrônica hospedada no Google Drive, facilitando a visualização em tempo real, o acesso remoto e a análise histórica dos dados.

Fluxo de Integração

A Figura 4 demonstra a integração entre o microcontrolador ESP32 e o *Google Sheets*¹¹ a qual é comumente realizada utilizando o protocolo de comunicação HTTP, mais especificamente através de requisições do tipo HTTP POST. Essa abordagem permite que o ESP32 envie dados diretamente para uma planilha hospedada na nuvem, facilitando o armazenamento e o monitoramento remoto de variáveis coletadas por sensores.

¹¹ <https://support.google.com/docs/answer/75943?hl=pt-BR>

Figura 4 - Fluxo de Integração entre a ESP32 e Google Sheet.



Fonte: Autor (2025).

Para que essa comunicação seja possível, utiliza-se um *Google Apps Script* (GAS) — um ambiente de script baseado em JavaScript que permite a automação de aplicações Google. O script é configurado e publicado como um Web App, recebendo e processando as requisições do ESP32. Cada vez que o dispositivo envia uma requisição POST com os dados, o script os insere automaticamente nas células da planilha. O fluxo de dados consiste em:

1. Coleta de Dados pelos Sensores
 - a. Sensores conectados ao ESP32 coletam dados ambientais (como temperatura, umidade etc.).
 - b. Os dados são lidos pelo ESP32 através de interfaces como GPIO, I2C ou ADC.

2. Processamento no ESP32
 - a. O ESP32 formata os dados em uma estrutura organizada (normalmente JSON).
 - b. Exemplo: `{"temperature":25.5, "humidity":60, "timestamp":"2023-05-20T14:30:00"}`.

3. Transmissão via Wi-Fi
 - a. O ESP32 se conecta a um Access Point (roteador Wi-Fi).
 - b. Estabelece conexão com a internet.
 - c. Envia os dados via HTTP POST para um endpoint do Google Apps Script.

4. Recebimento pelo Google Apps Script
 - a. Um script implantado como Web App recebe os dados.

- b. Faz a validação e tratamento básico dos dados.
- c. Prepara os dados para inserção na planilha.

5. Armazenamento no Google Sheets:

- a. O script insere os dados recebidos em uma planilha específica.
- b. Pode organizar em colunas como: Timestamp, Temperatura, Umidade etc.
- c. Atualiza a planilha em tempo real.

Tratamento e Análise dos Dados

Após a fase de coleta automatizada dos dados ambientais — realizada por sensores integrados ao microcontrolador ESP32 e conectados a uma plataforma de Internet das Coisas (IoT) — observou-se a presença de inconsistências nos registros iniciais, atribuídas à calibração e estabilização dos sensores nas primeiras leituras. Esses dados brutos apresentaram valores fora dos limites esperados, ruídos e variações abruptas que comprometiam a acurácia das análises subsequentes.

Nesse contexto, foi realizada a higienização dos dados — uma etapa fundamental no processo de engenharia de dados — que consiste na aplicação de técnicas sistemáticas para tratamento, limpeza e organização das informações coletadas. Esse procedimento foi essencial para garantir a confiabilidade, integridade e consistência dos dados, assegurando interpretações válidas e possibilitando comparações precisas ao longo do tempo (KLEPPMANN, 2017). Entre os principais tratamentos realizados, destacam-se:

Análise exploratória inicial

A análise exploratória de dados (AED) é uma etapa fundamental em projetos de pesquisa que envolvem a coleta de dados empíricos, especialmente em experimentos com sensores e dispositivos IoT. Seu principal objetivo é compreender, resumir e visualizar as principais características dos dados brutos, antes da aplicação de modelos estatísticos ou algoritmos mais complexos e identificar valores nulos ou dados fora de faixa.

Tratamento de Valores Ausentes ou Inválidos:

Durante a coleta de dados em projetos baseados em sensores com IoT, como o desenvolvido para o monitoramento e controle de parâmetros ambientais no cultivo sustentável em residências, é comum ocorrerem falhas ou inconsistências nos dados. Essas falhas podem manifestar na forma de valores ausentes (*missing values*) ou valores inválidos (incoerentes ou fora dos limites esperados). Nesse sentido ações podem ser tomadas como a remoção de registros incompletos (se a quantidade for irrelevante) ou a substituição por média, mediana ou valores preditos.

Na Tabela 12, as colunas temperatura ambiente e Umidade estão completamente vazias (nan) em todas as linhas visíveis. Isso pode indicar: falha no sensor, erro de leitura ou problema na integração com a plataforma de coleta. Algumas células apresentam pontuação incorreta (uso de ; em vez de : ou,). Há mistura de vírgula e ponto decimal (ex: 18,94 e 7.87), o que pode causar erros em análises automatizadas. A última linha está incompleta e corrompida, com separadores e datas mal formatadas.

Tabela 11 - Exemplo de dados inválidos.

Data	Horário da leitura de dados	Luminosidade (0 - 4095)	Temperatura Ambiente (°C)	Umidade (%)	Temperatura da solução (°C)	pH da solução (0 - 14)	Distância (cm)
17/05/2025	23:59:59	-1	nan	nan	19	7,48	40,9
17/05/2025	23:59:50	-1	nan	nan	19	7,44	40,6
17/05/2025	23:59:42	-1	nan	nan	19	7,69	40
17/05/2025	23:59:34	-1	nan	nan	19	7,49	41,4
17/05/2025	23:59:26	-1	nan	nan	19	7,53	40
17/05/2025	23:59:17	-1	nan	nan	19	6,15	39,5
17/05/2025	23:59:09	-1	nan	nan	19	7,28	42,1
17/05/2025	23:59:01	-1	nan	nan	19	7,59	40,1
17/05/2025	23:58:52	-1	nan	nan	19	7,51	40,3
17/05/2025	23:58:44	-1	nan	nan	19	7,51	40,9
17/05/2025	23:58:35	-1	nan	nan	19	7,38	40
17/05/2025	23:58:28	-1	nan	nan	19	7,47	40,4

Fonte: Autor (2025).



Dados Excluídos

Diante das inconsistências observadas na Tabela 12, recomenda-se a aplicação de um processo de tratamento de dados que inclua a correção da formatação geral, padronizando separadores, datas e casas decimais para garantir a uniformidade dos registros. Além disso, é

necessário remover ou corrigir linhas corrompidas, como aquelas com campos incompletos ou mal posicionados. Também é importante verificar se a constância da temperatura da solução é um comportamento esperado do sistema ou se indica falha na leitura. Por fim, sugere-se aplicar técnicas de interpolação ou exclusão seletiva para lidar com os valores ausentes, conforme os objetivos da análise estatística e a natureza dos dados coletados.

4.3. Resultados e Discussão

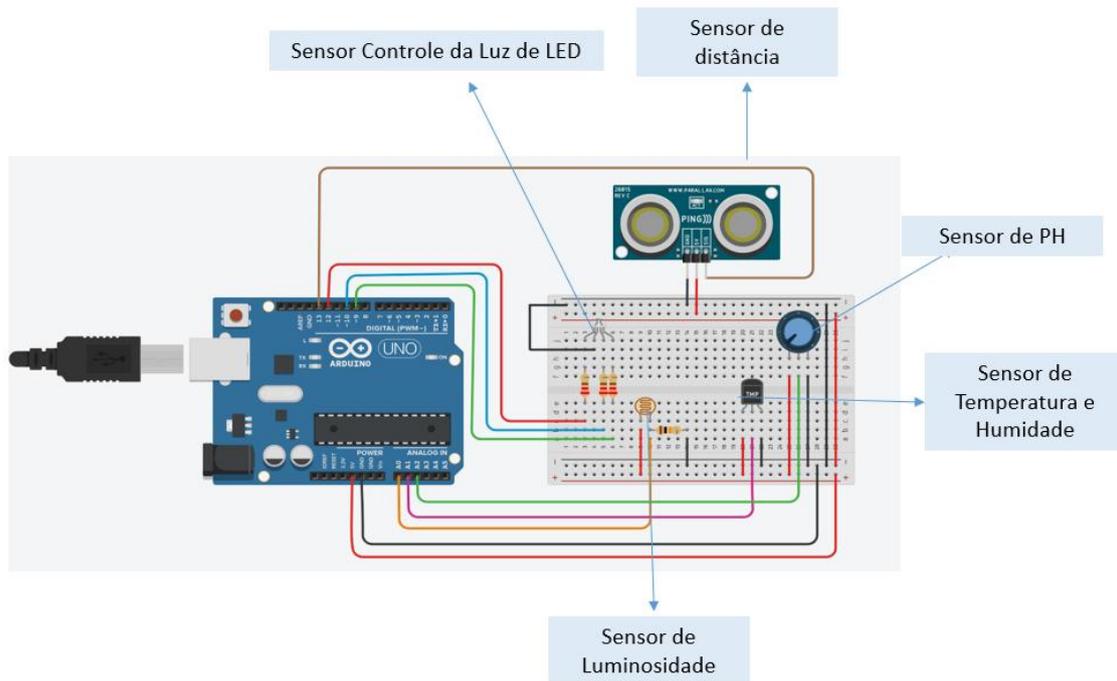
A primeira etapa foi consolidar a concepção do projeto, identificando os principais elementos que o comporiam. Nessa etapa, não houve uma preocupação imediata com o sucesso do cultivo da alface utilizado no experimento, mas com a definição das variáveis que seriam empregadas, como variáveis independentes, dependentes e fixas, além de estabelecer o escopo do Produto Mínimo Viável (MVP) a ser desenvolvido.

Nesse sentido, foram definidos os principais componentes físicos e tecnológicos a serem utilizados no projeto, Apêndice A. Isso incluiu a escolha do microcontrolador mais adequado, a plataforma de desenvolvimento para codificação e construção do software de monitoramento e controle, e da plataforma de IoT, considerando critérios como custo (preferencialmente gratuita), facilidade de uso, curva de aprendizado acessível, disponibilidade de documentação e existência de boas referências bibliográficas.

Após a escolha do microprocessador ESP32 e da plataforma de IoT Arduino Cloud, os passos seguintes envolveram a escolha dos sensores. Essa escolha foi orientada por modelos e tipos de dispositivos amplamente utilizados em experimentos anteriores, com base em referências bibliográficas que descreveram a aplicação desses equipamentos em projetos similares. Com isso, foram definidos os sensores que integrariam o presente projeto.

A Figura 5, representa a concepção do modelo físico do MVP desenvolvido, com todos os sensores conectados e o microcontrolador ESP32 em pleno funcionamento. Nessa etapa, foi realizado o mapeamento completo da pinagem necessária para a implantação do protótipo funcional. Em seguida, avançou-se para a configuração individual de cada sensor na placa ESP32, conectando-os aos respectivos pinos.

Figura 5 - Representação gráfica do circuito no Thinkcad.



Fonte: Autor (2025).

4.3.1. Implantação dos sensores utilizados no MVP

Outro contexto também testado com sucesso nesse cenário foi poder testar a utilização de todos os sensores previstos no projeto: umidade e temperatura, pH, intensidade luminosa, temperatura da solução nutritiva e por fim, o sensor de distância que mede o crescimento do cultivo (Figura 6).

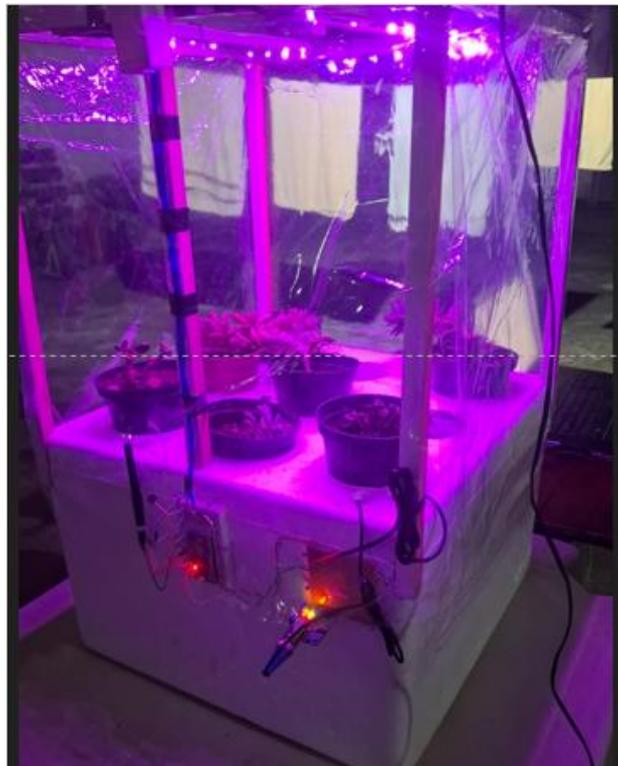
Figura 6 - Microcontrolador ESP 32 em uso.



Fonte Autor (2025)

Na Figura 7, mostra o microcontrolador ESP32 sendo testado com uma protoboard, e todo o circuito montado para o funcionamento do protótipo que foi utilizado para demonstrar a operacionalidade da solução.

Figura 7 - Protótipo da solução.



Fonte: Autor (2025)

Ainda na Figura 7, demonstra como o microcontroladora foi posicionada na solução. Foi implantado no recipiente de isopor utilizado para comportar a solução nutritiva. Também

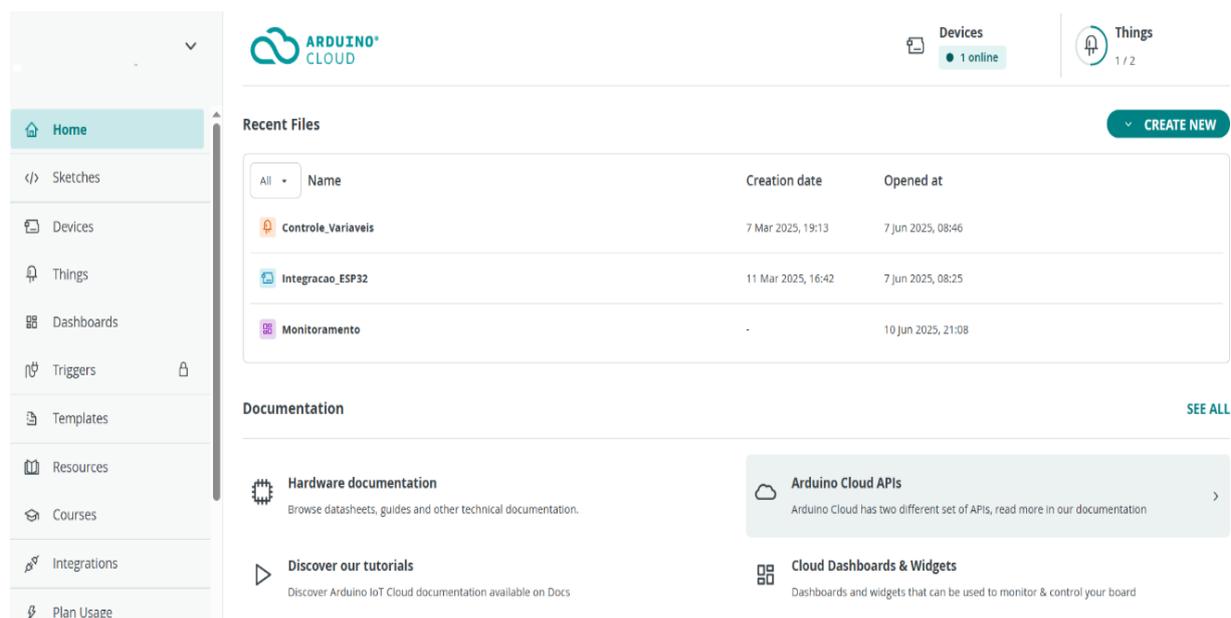
pode ser visto a simulação de uma estufa hidropônica construída para testar a aplicação funcionando por completo.

4.3.2. Utilização da Plataforma de Internet das Coisas (IoT)

Outro ponto não menos importante, consistiu na integração com a plataforma de IoT. Esse ponto fundamental para consolidar a validação da solução que fora proposta, uma vez que dentro do escopo do projeto está previsto o uso de uma plataforma de IoT, para monitoramento e controle dos dados que foram transmitidos pelos dispositivos físicos.

A Figura 8, mostra a tela inicial da plataforma Arduino Cloud, utilizada para gerenciamento e integração de dispositivos IoT. Na lateral esquerda, há um menu de navegação com as seguintes seções principais: Home, Sketches, Devices, Things, Dashboards, Triggers, Templates, Resources, Courses, Integrations e Plan Usage.

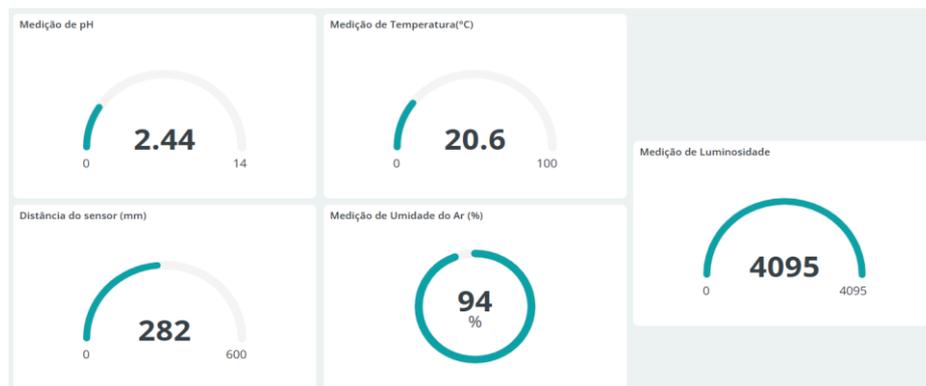
Figura 8 - Plataforma de IoT em funcionamento



Fonte: (Arduino, 2025).

A Figura 9, apresenta o ambiente de monitoramento da plataforma em que são apresentados os gráficos para monitoramento das condições ambientais recebidos dos sensores fisicamente conectados ao microprocessador ESP32.

Figura 9 - Monitoramento dos parâmetros ambientais na plataforma IoT.



Fonte: Autor (2025).

4.3.3. Preparação da Solução Nutritiva

Uma vez todos os ambientes implantados e em pleno funcionamento, o próximo passo consistiu em preparar a solução nutritiva no recipiente escolhido e depositar nos repositórios as mudas para dar início ao processo de monitoramento e controle do cultivo.

A solução nutritiva é uma espécie de fertilizante mineral misto composto por dois ou mais nutrientes essenciais combinados em uma única formulação. Ele é amplamente utilizado na agricultura, incluindo sistemas hidropônicos (como o método Kratky), para fornecer os macros e micronutrientes necessários ao crescimento das plantas, como a alface. Foram utilizadas duas embalagens com as composições químicas demonstrada na Tabela 13:

1. Flex Vermelho (A) apresenta uma composição mais diversificada, incluindo micronutrientes como ferro, boro, manganês, cobre, zinco, molibdênio, níquel e cobalto.
2. Flex Azul (B) é mais concentrado em macronutrientes, especialmente nitrogênio (10%) e cálcio (15%), sendo ideal para fases de crescimento vegetativo e fortalecimento estrutural.

Tabela 12 - Composição de nutrientes da solução nutritiva.

FLEX VERMELHO (A)		FLEX AZUL (B)	
Nutriente	Percentual	Nutriente	Percentual
Nitrogênio (N)	3%	Nitrogênio (N total)	10%
Fósforo (P ₂ O ₅)	8%	Cálcio (Ca total)	15%
Potássio (K ₂ O)	30%	Magnésio (Mg)	2%
Enxofre (S)	3%	Total	27%
Magnésio (Mg)	1%		
Ferro (Fe)	0,14%		
Boro (B)	0,04%		
Manganês (Mn)	0,04%		
Cobre (Cu)	0,03%		
Zinco (Zn)	0,019%		
Molibdênio (Mo)	0,009%		
Níquel (Ni)	0,006%		
Cobalto (Co)	0,002%		
Total	45%		

Fonte: Autor (2025).

O recipiente que foi utilizado no projeto tem capacidade de 30 (trinta) litros. O fertilizante adquirido com 690g destinava-se a uma solução de 1.000 (mil) litros de água. Desta forma, precisou fazer adequação da quantidade de fertilizante para um volume de 30 (vinte) litros aproximadamente.

Primeiro Passo: Foi diluído cada produto separadamente em recipientes de 5 (cinco) litros de água para posteriormente incorporar ao reservatório de solução nutritiva utilizada no estudo. A fim de não haver precipitação de cálcio, prejudicando a qualidade da solução, foi evitado não misturar as duas embalagens no mesmo recipiente ao mesmo tempo. Ao final obteve-se uma solução muito concentrada.

Segunda Passo: A fórmula utilizada para preparar a solução nutritiva correspondeu a 100ml da solução superconcentrada, em 20 (vinte) litros e água. Como o recipiente utilizado no estudo é um isopor com capacidade de 30 (trinta) litros de água, chegou-se na Tabela 14.

Tabela 13 - Calibragem da Solução.

Solução A	Solução B
<p>100 ml está para 20 litros de água</p> <p>150 ml está para 30 litros de água</p> <p>Aplicar cálculo utilizando Regra de 3 simples:</p> <div style="border: 2px solid orange; border-radius: 15px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p style="text-align: center;">$100 = 20$</p> <p style="text-align: center;">$X = 30$</p> <p style="text-align: center;">$X = 150 \text{ ml}$</p> </div>	<p>100 ml está para 20 litros de água</p> <p>150 ml está para 30 litros de água</p> <p>Aplicar cálculo utilizando Regra de 3 simples:</p> <div style="border: 2px solid orange; border-radius: 15px; padding: 10px; width: fit-content; margin: 10px auto;"> <p style="text-align: center;">$100 = 20$</p> <p style="text-align: center;">$X = 30$</p> <p style="text-align: center;">$X = 150 \text{ ml}$</p> </div>

Fonte: Autor (2025).

Terceiro Passo: Preparar as mudas com 20 (vinte) dias de germinação no recipiente com a solução nutritiva já pronta para receber as plantas que foram utilizadas no estudo. A Figura 10 (a) representa os elementos para a preparação da solução nutritiva, conforme Tabela 14. A figura 10 (b) e 10.c, apresentam as soluções já diluídas e preparadas. Na figura 10.d, as mudas foram posicionadas em nove orifícios preparados na tampa do isopor que serviu de recebimento para o crescimento da folhagem.

Figura 10 - Elaboração da Solução Nutritiva.



(a)



(b)



(c)



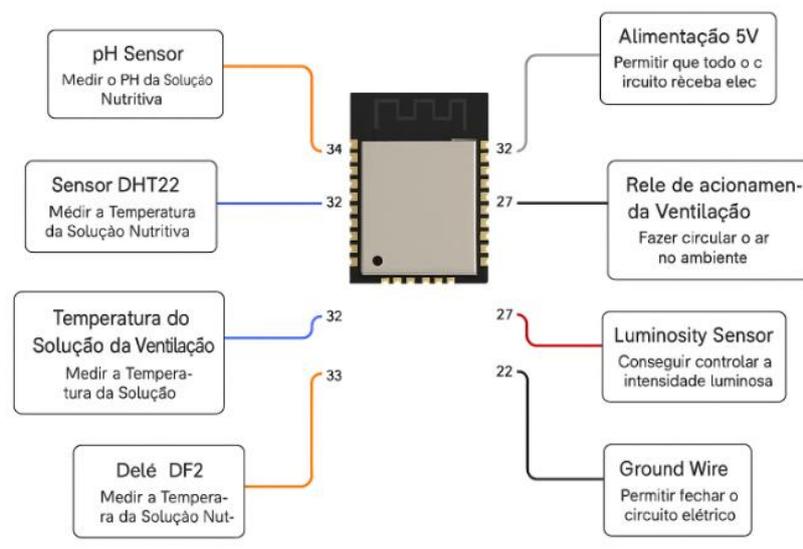
(d)

Fonte: Autor (2025).

4.3.4. Circuito Elétrica do MVP:

A Figura 11, apresenta o desenho do circuito do MVP. O esquemático apresentado na Figura 13, mostra a representação lógica das conexões elétricas dos componentes eletrônicos que estão conectados entre si previsto no circuito eletrônico. A ESP32 (Microcontrolador principal), corresponde ao coração do sistema, responsável pelo controle, processamento dos dados dos sensores e comunicação com a rede Wi-Fi, alimentado por $VCC = 3.3V$ e GND no qual diversos pinos estão conectados a sensores para serem utilizados na coleta de dados ambientais. Todo o sistema é alimentado por uma conexão USB Serial (à esquerda) através da porta USB para permitir a transmissão de código via IDE Arduino.

Figura 11 - Esquemático do Circuito Elétrico.



Fonte: Autor (2025).

Com a ESP32 em pleno funcionamento, o próximo passo foi realizar a configuração de todos os sensores na ESP32. Abaixo, Tabela 15, é apresentado as configurações de pinagem de cada sensor:

1. Os pinos GPIO 34 a 39 no ESP32 são entradas analógicas apenas (não têm função de saída digital), por isso são ideais para sensores como o de pH.
2. Os pinos GPIO 25, 26, 27, 32, 33 são versáteis, podendo ser usados como entrada ou saída, PWM, ADC etc.
3. O VL530X é um sensor de distância que pode usar comunicação I2C, e os pinos 25 e 26 podem estar configurados como SDA/SCL.
4. O DHT22 é um sensor digital que requer apenas um pino de dados (GPIO 32).
5. O relé no GPIO 27 permite controle de dispositivos de potência como ventiladores.
6. O sensor de luminosidade no GPIO 22 pode ser analógico ou digital, dependendo do modelo.

Tabela 14 - Tabela de pinagem do projeto.

Sensor / Função	Finalidade	Pino ESP32
Sensor de pH	Mede o pH da solução nutritiva.	GPIO 34
Sensor LIDAR (VL530X)	Mede o crescimento da alface.	GPIO 25 e 26
Sensor DHT22	Mede temperatura e umidade do ambiente.	GPIO 32
Sensor de temperatura da solução	Mede a temperatura da solução nutritiva.	GPIO 33
Relé de ventilação	Aciona ventilador para circulação de ar.	GPIO 27
Sensor de luminosidade	Monitora intensidade luminosa.	GPIO 22
Alimentação 5V	Fornece energia ao circuito.	3º pino (5V)
Fio terra (GND)	Fecha o circuito elétrico.	1º pino (GND)
Sensor de pH	Mede o pH da solução nutritiva	GPIO 34

Fonte: (Autor, 2025)

4.4. Conclusões

4.4.1. Lições aprendidas do primeiro Cenário

O conceito de "lições aprendidas" refere-se ao conhecimento adquirido com experiências passadas, especialmente em projetos, atividades práticas, pesquisas ou processos organizacionais. Essas lições envolvem tanto os sucessos quanto os erros, sendo registradas com o objetivo de melhorar o desempenho futuro, evitar falhas recorrentes e replicar boas práticas. Segundo Kerzner (2017), as lições aprendidas são fundamentais para o amadurecimento da gestão de projetos, uma vez que promovem a retenção do conhecimento organizacional e o desenvolvimento de soluções mais eficientes em empreendimentos futuros.

A partir desse contexto, tendo como referências as atividades realizadas, alguns pontos serviram como lições aprendidas:

- a) A seleção dos componentes físicos deve ser precedida por uma pesquisa criteriosa, uma vez que a escolha inadequada pode comprometer a confiabilidade dos dados coletados. Sensores como os de pH e Lidar, por exemplo, são sensíveis a variações na corrente elétrica, e uma alimentação inadequada — especialmente em relação à voltagem — pode resultar em leituras imprecisas, inconsistentes ou aleatórias.

- b) A seleção da plataforma de IoT é um aspecto estratégico do projeto, pois impacta diretamente a escalabilidade, usabilidade e os custos da solução. A maioria das plataformas oferece um conjunto básico de funcionalidades de forma gratuita; no entanto, projetos mais complexos, que exigem integrações avançadas, maior volume de dados ou múltiplos dispositivos conectados, geralmente requerem planos pagos, com cobrança mensal. Portanto, é fundamental que esses custos sejam previstos no planejamento orçamentário do projeto, a fim de garantir a viabilidade e a continuidade da solução ao longo do tempo. Além disso, deve-se considerar fatores como a documentação disponível, a curva de aprendizado da plataforma e o suporte à comunidade de desenvolvedores.

c) Para o sucesso do cultivo controlado, é essencial que a solução inclua, no mínimo, um projeto de iluminação eficiente e bem dimensionado. Isso envolve a escolha de LEDs apropriados, com espectros e intensidades luminosas compatíveis com as exigências da cultura em questão. No caso específico da alface, é recomendada uma intensidade média de aproximadamente $260 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ de luz fotossinteticamente ativa (PAR). A ausência ou inadequação da iluminação compromete diretamente o processo de fotossíntese, resultando em baixo desenvolvimento das plantas, crescimento desuniforme e redução da qualidade da produção. Portanto, o sistema deve prever não apenas a escolha dos dispositivos luminosos corretos, mas também o posicionamento, tempo de exposição diária e controle automatizado, quando possível, para garantir condições ideais ao longo do ciclo da planta.

Figura 12 - Demonstração da iluminação inadequada.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 12 (a), demonstra que a incidência de luminosidade sobre o cultivo é muito insuficiente. Nas figuras 12 (b) e 12 (c), demonstram a estagnação do crescimento das plantas por falta de luminosidade adequada em razão da escolha de luz de *leds* que gere a intensidade luminosa adequada para o cultivo escolhido:

d) É fundamental utilizar equipamentos de medição precisos e adequados para monitorar parâmetros críticos, como a intensidade luminosa e o pH da solução nutritiva. A correta calibração desses dispositivos é indispensável, pois medições imprecisas podem levar a interpretações errôneas das condições do cultivo, comprometendo o desenvolvimento das plantas. A intensidade luminosa influencia diretamente a fotossíntese, enquanto o pH afeta a disponibilidade de nutrientes para a planta. Portanto, a falta de calibração ou o uso de equipamentos inadequados aumentam significativamente o risco de falhas no cultivo, podendo resultar em crescimento deficiente, baixa produtividade ou até a perda total da produção. Assim, a manutenção periódica e a calibração correta dos sensores devem fazer parte do protocolo operacional do sistema para garantir a confiabilidade dos dados e o sucesso do cultivo.

4.4.2. Análise dos dados Coletados

A análise dos dados coletados constitui uma etapa fundamental nesta pesquisa, permitindo avaliar a eficácia da solução computacional desenvolvida para o monitoramento e controle dos parâmetros ambientais no cultivo doméstico da alface (*Lactuca sativa*).

Monitoramento do Crescimento do Cultivo

A Figura 13 apresenta o monitoramento do crescimento diário do cultivo de alface ao longo dos primeiros 13 dias, iniciando em 06/05/2025. A medição é feita em centímetros (cm), e a tabela inclui também a taxa de crescimento e o percentual de crescimento diário. Os valores de crescimento estão na faixa de 8,5 mm, com pequenas variações ao longo dos dias. Isso indica que não houve crescimento significativo durante esse período, na verdade, há leve redução nas medições. Esse contexto foi influenciado pela temperatura e umidade, desequilíbrio na solução nutritiva, além inconsistência na coleta de dados a partir do sensor Lidar.

Figura 13 - Crescimento do cultivo da alface por dia (entre os dias 07/05/2025 e 25/05/2025).

Início da medição	Início da medição	Primeiros 13 Dias da Medição do Crescimento do Cultivo da Alface (cm)																	
06/05/2025	07/05/2025	08/05/2025	09/05/2025	10/05/2025	11/05/2025	12/05/2025	13/05/2025	14/05/2025	15/05/2025	16/05/2025	17/05/2025	18/05/2025	19/05/2025	20/05/2025	21/05/2025	22/05/2025	23/05/2025	24/05/2025	25/05/2025
Medição Diária	40,46	40,42	40,39	40,35	40,13	40,13	40,03	39,94	39,94	39,96	40,13	40,28	40,23	40,36	40,32	40,26	40,05	39,83	39,61
Taxa de Crescimento	0,00	0,04	0,07	0,12	0,33	0,34	0,43	0,52	0,52	0,50	0,34	0,18	0,23	0,11	0,15	0,21	0,41	0,64	0,85
% de Crescimento	0,0%	0,1%	0,2%	0,3%	0,8%	0,8%	1,1%	1,3%	1,3%	1,2%	0,8%	0,4%	0,6%	0,3%	0,4%	0,5%	1,0%	1,6%	2,1%

Fonte: Autor (2025).

A Figura 14 também apresenta dados de crescimento diário do cultivo de alface ao longo de 15 dias, entre 26/05/2025 e 09/06/2025, com três tipos de informação por dia:

1. Fase inicial (26/05 a 01/06):
 - a. Crescimento lento e estável, com valores entre 39,42 cm e 39,73 cm;
 - b. Taxas de crescimento positivas, mas crescentes (de 1,05 cm para 0,74 cm);
 - c. Percentuais de crescimento entre 2,6% e 1,8%, indicando desaceleração.

Ao realizar a análise dessa fase, foi identificado desaceleração de crescimento e ações de contorno foram realizadas como correção do Ph da solução e calibração do sensor de crescimento.

2. Fase intermediária (02/06 a 04/06):
 - a. A partir de 02/06, há queda abrupta que pode ter sido causado por alguma ação de calibração do sensor de crescimento. Com a calibração realizada, logo percebe-se que o processo de medição do processo de crescimento é corrido e os valores adequados são mapeados.
3. Fase Excepcional (05/06 a 09/06):
 - a. Com a calibração corrigida, os valores coletados entre os dias 05 e 09 de junho foram ajustados e a taxa de crescimento do cultivo foi medida de forma adequada, com crescimento médio de 5%.
 - b. Ao final, observou-se taxa de crescimento de 30% do cultivo em estudo. Outro ponto importante é que o cultivo da alface crespa atingiu tamanho comercial.

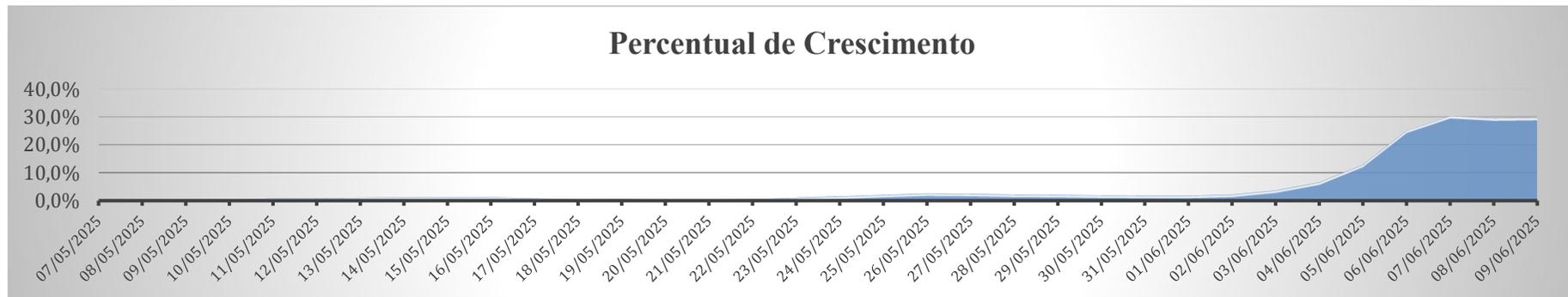
Figura 14 - Medição do Crescimento do cultivo da alface por dia (entre os dias 26/05/2025 e 09/06/2025).

Próximos 15 Dias da Medição do Crescimento do Cultivo da Alface (cm)														
26/05/2025	27/05/2025	28/05/2025	29/05/2025	30/05/2025	31/05/2025	01/06/2025	02/06/2025	03/06/2025	04/06/2025	05/06/2025	06/06/2025	07/06/2025	08/06/2025	09/06/2025
39,42	39,44	39,56	39,58	39,67	39,73	39,71	39,56	38,96	37,79	35,22	30,33	28,22	28,56	28,49
1,05	1,03	0,91	0,88	0,80	0,74	0,76	0,90	1,51	2,68	5,24	10,14	12,24	11,91	11,98
2,6%	2,5%	2,2%	2,2%	2,0%	1,8%	1,9%	2,2%	3,7%	6,6%	13,0%	25,0%	30,3%	29,4%	29,6%

Fonte: (Autor, 2025)

O Gráfico 5, reflete os tempos e movimentos dos dados apresentados nas respectivas tabelas das Figuras 13 e 14. Os dados apresentados demonstram que a partir do dia 05 de junho, houve abrupta mudança dos dados coletados. Isso ocorreu em razão da aplicação de alguns ajustes na configuração do sensor de distância e melhor posicionamento para medir, adequando ao crescimento do cultivo.

Gráfico 5 - Medição do Crescimento do cultivo da alface por dia (entre os dias 26/05/2025 e 09/06/2025).



Fonte: Autor (2025)

Médias das Variáveis Independentes

A Tabela 16 contém a consolidação dos intervalos de 5 dias dos dados experimentais, coletados durante o cultivo de alface com foco em variáveis independentes monitoradas ao longo do tempo, entre os dias 06/05/2025 e 05/06/2025. A média de distância apurada foi equivalente a 11,86 cm. Isso significa que a planta cresceu essa altura a partir do dia que iniciou a medição. A temperatura ambiente variou em média de 20,57°C. Perceba que a temperatura ambiente manteve-se constante a partir do dia 21/05/2025. A média da umidade ficou na faixa de 77,91°C. Essa variação entre a temperatura ambiente, média de umidade e média de temperatura da solução ofereceu as condições ideais do ambiente para o crescimento do cultivo. Foi possível ser identificado e monitorado em tempo real pela plataforma de IoT, integrada ao ambiente físico pelo processador ESP32 que coletava as informações em tempo real.

Tabela 15 - Médias das leituras das várias independentes a cada cinco dias.

Variáveis Independentes	06/05/2025	11/05/2025	16/05/2025	21/05/2025	26/05/2025	31/05/2025	05/06/2025
Média de Distância (cm)	40,42	40,03	40,23	40,05	39,56	39,56	28,56
Temperatura Ambiente (°C)	18,37	17,51	19,26	22,51	21,27	22,64	22,48
Média de Umidade (%)	57,14	79,34	76,78	81,08	79,70	84,58	86,80
Média de Temperatura da solução (°C)	20,67	19,31	19,26	21,54	21,37	21,56	21,56
Média de pH da solução (0 - 14)	6,97	7,23	7,29	6,73	4,64	2,70	5,58

Fonte: Autor (2025)

Outro ponto observado foi com relação ao Ph da solução. Entre 21/05/2025 e 31/05/2025, houve queda acentuada no pH, passando de 6,73 para 2,70. Esse cenário poderia prejudicar o crescimento sustentável do cultivo. Automaticamente, foi mapeado pelos gráficos de monitoramento e controle que permitiram que ações de contornos fossem tomadas e que a solução nutritiva ficasse com o Ph ideal, próximo de 5,58. Essa acidificação da solução nutritiva, possivelmente por excesso de nutrientes ácidos ou contaminação do processo físico-químico do metabolismo da planta.

Todos as ações corretivas somente foram possíveis a partir do processo de monitoramento e controle da solução, permitindo que todos os parâmetros fossem controlados e as respectivas ações de contorno pudessem ser adotadas.

A Figura 15, apresenta exemplifica como os indicadores foram exibidos na plataforma IoT em nuvem. Nessa figura, os apresentados são exibidos em tempo real, isso significa, que os dispositivos físicos capturam as condições ambientais e através do microprocessador essas informações são transmitidas à plataforma IoT em nuvem. Com esse monitoramento, as ações de justes podem ser realizadas e estabelecer as condições ideias para o cultivo que está sendo produzido.

Figura 15 - Visualização dos indicadores na plataforma de IoT.



Fonte: Autor (2025).

A Figura 16, apresenta exemplifica como os indicadores foram exibidos na plataforma mobile. Nessa figura, também os dados são exibidos em tempo real. Com esse monitoramento, as ações de justes podem ser realizadas e estabelecer as condições ideias para o cultivo que está sendo produzido.

Figura 16 - Visualização dos indicadores no aplicativo mobile.



Fonte: Autor (2025).

4.5. Referência Bibliográficas

CHANCHÍ-GOLONDRINO, Gabriel-Elías; OSPINA-ALARCÓN, Manuel-Alejandro; SABA, Manuel. **Sistema IoT para el monitoreo de variables climatológicas en cultivos de agricultura urbana**. *Revista Científica*, v. 44, n. 2, p. 257–271, 2022

CRESWELL, John W. **Research design: qualitative, quantitative, and mixed methods approaches**. 4. ed. Thousand Oaks, CA: Sage, 2014.

FRIHA, Othmane; FERRAG, Mohamed Amine; SHU, Lei; MAGLARAS, Leandros; WANG, Xiaochan. **Internet of Things for the Future of Smart Agriculture: A Comprehensive Survey of Emerging Technologies**. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, v. 8, n. 4, p. 718–752, abr. 2021.

FURLANI, Pedro Roberto. Soluções nutritivas: formulação e aplicações. In: COMETTI, Nilton Nélio; FURLANI, Pedro Roberto; RUIZ, Hugo Alberto; FERNANDES FILHO, Elpídio Inácio. **Soluções nutritivas: formulação e aplicações**. Colatina: EAFCOL, 1998.

GIL, Antônio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GUBBI, Jayavardhana; BUYYA, Rajkumar; MARUSIC, Slaven; PALANISWAMI, Marimuthu. **Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions**. *Future Generation Computer Systems*, v. 29, p. 1645–1660, 2013.

GUSE, Rosana. **Arduino Cloud: Guia Completo para Projetos IoT**. MakerHero, 7 mar. 2024.

KERZNER, Harold. **Gestão de projetos: as melhores práticas**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2020.

KRATKY, B. A. **Three non-circulating hydroponic methods for growing lettuce**. Hilo, Hawaii: University of Hawaii, College of Tropical Agriculture and Human Resources (CTAHR), 2009.

MACHADO, A. T.; MACHADO, C. T. de T. **Agricultura urbana: hortas inteligentes e sustentabilidade em ambientes urbanos**. Brasília, Embrapa, 2022

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de metodologia científica**. 8. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

MCKINSEY & COMPANY. **McKinsey Technology Trends Outlook 2023**. São Paulo: McKinsey & Company, 2023.

MONK, Simon. **Programação com Arduino: começando com sketches**. São

NAIK, Nidhi. Choice of Effective Messaging Protocols for IoT Systems: **MQTT, CoAP, AMQP and HTTP**. *International Journal of Wireless and Microwave Technologies*, v. 7, n. 1, p. 1–11, 2017.

SICARI, Sabrina; RIZZARDI, Alessandra; GRIECO, Luigi Alfredo; COEN-PORISINI, Alberto. **Security, Privacy & Trust in Internet of Things: The Road Ahead**. *Computer Networks*, v. 76, p. 146–164, 2015

SILVA, Wanderson de Vasconcelos Rodrigues da; SILVA-MANN, Renata. **Transformações na agricultura: uma abordagem crítica sobre a agricultura de precisão**. *IOSR Journal of Business and Management*, v. 25, n. 12, p. 37–50, dez. 2023.

SOMMERVILLE, Ian. **Engenharia de software**. 9. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2011.

SOUZA, Jhonatan Carvalho de; GUIMARÃES, Núbia Rosa da Silva. **Utilizando sensores de IoT e Big Data para aprimorar a produção de culturas de precisão: uma análise**. Universidade Federal de Catalão, 2021.

SUINAGA, Fábio Akiyoshi; BOITEUX, Leonardo Silva; CABRAL, Cléia Santos; RODRIGUES, Cecília da Silva. **Desempenho produtivo de cultivares de alface crespa**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2013.

TAIZ, Lincoln et al. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

WEHR, Aloysius; LOHR, Uwe. **Airborne Laser Scanning – An Introduction and Overview**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 54, p. 68–82, 1999

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. **The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review**. *Precision Agriculture*, v. 13, p. 693–712, 2012.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Síntese dos resultados

A realização dos experimentos e a subsequente análise dos dados obtidos permitiram confirmar o êxito do projeto, cujo objetivo central era desenvolver uma solução computacional voltada para o monitoramento e controle de parâmetros ambientais no cultivo sustentável de hortaliças em ambientes residenciais. A integração de sensores e componentes físicos a uma plataforma baseada em Internet das Coisas (IoT) demonstrou ser tecnicamente viável e eficaz, evidenciando o potencial dessas tecnologias para promover práticas agrícolas inteligentes no contexto doméstico.

A aplicação prática da solução no cultivo da alface (*Lactuca sativa*) permitiu validar a funcionalidade, destacando a capacidade do sistema em fornecer dados precisos e em tempo real, essenciais para a tomada de decisões no manejo das plantas. Os resultados obtidos reforçam a relevância da abordagem proposta, especialmente no cenário urbano, em que a adoção de tecnologias sustentáveis e acessíveis pode contribuir significativamente para a segurança alimentar, a redução do desperdício de recursos e a promoção da agricultura de precisão em pequena escala. Com base nesse direcionamento, todos os objetivos específicos foram alcançados e foram alcançados na média em que:

1. O desenvolvimento do MVP (Produto Mínimo Viável) foi concluído com êxito, integrando sensores físicos capazes de monitorar parâmetros ambientais essenciais — como temperatura, umidade, pH, luminosidade e crescimento vegetal — a uma plataforma de Internet das Coisas (IoT). Essa integração entre os componentes físicos e o ambiente em *cloud* funcionou de forma satisfatória. Esse cenário demonstrou a viabilidade técnica da proposta, permitindo a coleta automatizada e precisa de dados em tempo real, fundamentais para o acompanhamento do cultivo de hortaliças em ambientes residenciais.
2. A funcionalidade de monitoramento e controle remoto em tempo real foi validada com sucesso, permitindo a supervisão contínua do ecossistema quando o cultivo foi inserido. A plataforma IoT desenvolvida possibilitou a visualização e o ajuste dinâmico dos parâmetros ambientais, promovendo maior autonomia e eficiência no manejo do cultivo.

3. O sistema implementado foi capaz de monitorar automaticamente os indicadores de crescimento do cultivo, armazenando os dados coletados em nuvem de forma segura e estruturada. Essa abordagem permitiu a geração de indicadores analíticos que subsidiam a tomada de decisão orientada por dados, com foco na otimização do crescimento vegetativo das plantas.
4. O projeto contribuiu significativamente para o fomento da produção sustentável em residências, ao demonstrar que é possível implementar soluções tecnológicas baseadas em IoT com baixo custo e alta eficiência energética. A proposta reforça a importância da democratização do acesso a tecnologias inteligentes no contexto urbano, promovendo práticas agrícolas que respeitam o meio ambiente e reduzem o consumo de recursos naturais. Além disso, o modelo desenvolvido pode servir como referência para iniciativas de agricultura urbana voltadas à segurança alimentar e à sustentabilidade.

Limitações da pesquisa

O tempo foi um fator significativamente limitante para o desenvolvimento desta pesquisa. A execução do projeto exigiu diversas etapas, como a definição do escopo, montagem do protótipo, calibração dos sensores, testes e validações, o que restringiu a disponibilidade para a realização de experimentos adicionais.

Para alcançar resultados mais robustos e generalizáveis, seria necessário um período mais longo que permitisse não apenas a repetição dos experimentos com a mesma espécie — no caso, a alface (*Lactuca sativa*) —, mas também a aplicação do sistema em outras culturas. A ampliação do número de ciclos de cultivo e a diversificação das espécies possibilitariam a coleta de dados mais abrangentes, contribuindo para uma análise comparativa mais precisa sobre o desempenho do protótipo em diferentes condições. Dessa forma, futuros estudos podem aprofundar a avaliação da solução proposta, validando a eficiência e adaptabilidade em distintos contextos de cultivo doméstico.

APÊNDICE A – LINHA DE PESQUISA E ENQUADRAMENTO NOS CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DA CAPES

O Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade (PPGEAS), tem por objetivo principal a qualificação de profissionais de diferentes áreas da engenharia (sobretudo aqueles aptos a desenvolverem projetos de pesquisa e inovação relacionados com a área das Engenharia I. Visa ao aprofundamento dos conhecimentos científicos adquiridos na graduação; promoção da competência pedagógica, ética e científica para desenvolvimento de investigação empírica, por meio de pesquisas aplicadas na área de engenharia; aprimoramento e capacitação técnica de profissionais das empresas e instituições. O PPGEAS, Área de Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade, apresenta atualmente duas linhas de pesquisa:

1 – Linha I – Tecnologia e gestão em construção civil e infraestrutura.

1 – Linha II – Gestão e tecnologias ambientais.

Esta pesquisa segue a segunda linha do PPGEAS, o principal enfoque está no desenvolvimento de práticas já existentes de gestão sustentável e as tecnologias associadas com as atividades humanas e recursos naturais, considerando os aspectos socioeconômicos e ambientais.

Os produtos deste trabalho contribuem para a agricultura indoor sendo possível sua produção em residências, promovendo inovação no contexto que atualmente é realizado de forma artesanal sem referências consolidadas de produção nesse contexto. O trabalho permitirá, com o uso de sensores e componentes integrados em uma plataforma de IoT, a viabilidade do monitoramento do cultivo de hortaliças em residências e permitindo acesso a alimentação saudável de produção próprio.

APENDICE B - TECNOLOGIAS APLICADAS AO PROJETO

Internet das Coisas (IoT)

A Internet das Coisas (IoT, do inglês Internet of Things) refere-se à interconexão digital entre objetos físicos por meio da internet, permitindo que esses dispositivos colem, compartilhem e processem dados automaticamente, sem intervenção humana direta. Essa tecnologia envolve sensores, softwares e redes que tornam objetos do cotidiano capazes de comunicar e executar ações inteligentes com base nas informações recebidas (GUBBI et al., 2013).

O termo "Internet das Coisas" foi popularizado no final dos anos 1990 por Kevin Ashton, pesquisador do MIT, que idealizou um sistema em que objetos físicos poderiam ser conectados à internet por meio de sensores de identificação por radiofrequência (RFID), promovendo uma integração entre o mundo físico e o digital (Ashton, 2009).

De acordo com a consultoria McKinsey & Company (2023), o mercado global de IoT deverá movimentar mais de US\$ 1,5 trilhão até 2030, com destaque para aplicações nas áreas da saúde, agricultura e automação residencial — setores diretamente ligados à qualidade de vida e à sustentabilidade.

Com o propósito de validar demonstrar o uso da IoT no contexto nesse projeto, a plataforma escolhida de IoT foi a Arduino Cloud, por ser uma solução baseada em nuvem que oferece recurso para programação, visualização de dados em tempo real e automação de dispositivos conectados. Essa plataforma permite a integração com sensores que monitoram variáveis ambientais críticas ao desenvolvimento vegetal, como temperatura, umidade do ar e do solo, luminosidade, pH e crescimento foliar.

Dessa forma, a adoção da Arduino Cloud como plataforma central - com acesso remoto por meio de interfaces móveis ou web - no presente projeto de pesquisa traz soluções tecnológicas de baixo custo e eficiência operacional, aspectos indispensáveis na construção de sistemas inteligentes para agricultura doméstica com o uso de IoT.

Rede Wifi

A rede Wi-Fi (Wireless Fidelity) é uma tecnologia de comunicação sem fio baseada no padrão IEEE 802.11, amplamente utilizada para conectar dispositivos à internet por meio de ondas de rádio. No contexto de sistemas embarcados e aplicações de Internet das Coisas (IoT), o Wi-Fi tem se consolidado como uma das principais formas de conectividade pela alta taxa de transmissão de dados, baixo custo de implementação e compatibilidade com microcontroladores como o ESP32 (SICARI *et al.*, 2015).

O Wi-Fi utiliza protocolos de comunicação como o TCP/IP (Transmission Control Protocol / Internet Protocol), que garante integridade e confiabilidade na transferência de dados. Além disso, permite integração com protocolos de aplicação como o MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), amplamente utilizado em arquiteturas IoT pela leveza, eficiência energética e suporte a redes com largura de banda limitada (NAIK, 2017).

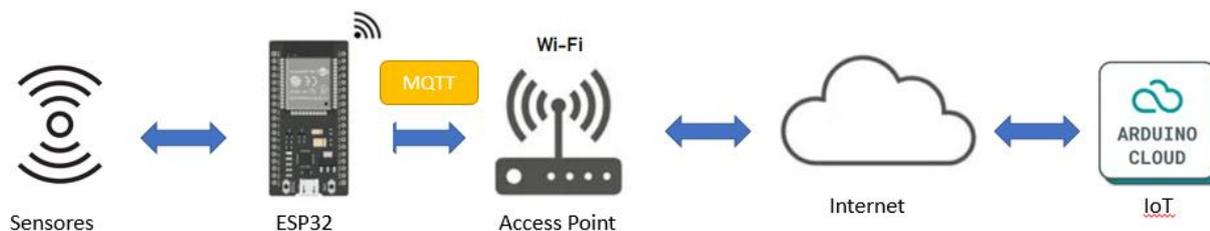
Segundo Gubbi *et al.* (2013), a conectividade em tempo real é uma das bases para que sistemas IoT possam ser usados em aplicações como agricultura de precisão, automação residencial e cidades inteligentes.

Redes Wi-Fi são amplamente disponíveis em ambientes urbanos e residenciais, tornando-as altamente acessíveis e fáceis de configurar em projetos acadêmicos, protótipos ou aplicações comerciais. Dispositivos como o ESP32 já vêm com Wi-Fi integrado, reduzindo custos e complexidade do projeto.

A Wi-Fi servirá como ponte de comunicação entre os dispositivos locais e os serviços remotos de computação em nuvem. Isso é crucial em IoT, boa parte da análise, visualização e controle ocorre em dashboards baseados na web ou aplicativos móveis.

A Figura 17 representa a arquitetura de comunicação de um sistema IoT aplicado ao monitoramento e controle ambiental no cultivo de hortaliças em residências. Esse fluxo descreve como os dados coletados pelos sensores são transmitidos até a nuvem e visualizados remotamente pelo usuário.

Figura 17 - Conectividade dos componentes do projeto



Fonte: Autor (2025).

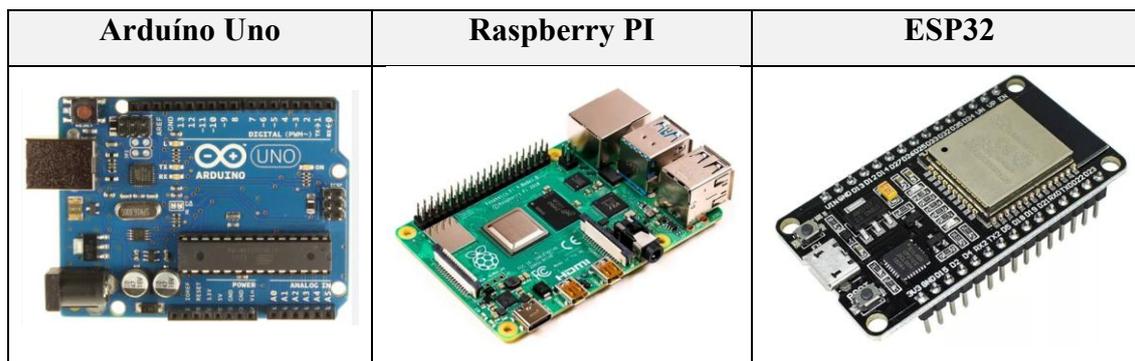
Microcontroladores

O uso de microcontroladores em projetos de agricultura de precisão tem se tornado cada vez mais relevante pela necessidade de monitoramento, automação e controle eficiente de variáveis ambientais e operacionais no cultivo agrícola (SILVA, I. C. C. da., 2024).

Microcontroladores são pequenos computadores embarcados que integram um processador, memória e interfaces de entrada/saída em um único chip. Exemplos populares incluem o ESP32, família Arduino, ESP8266 e Raspberry Pi Pico. Esses dispositivos são altamente eficientes para tarefas repetitivas e em tempo real, como leitura de sensores e acionamento de atuadores.

Esses tipos de equipamentos são muito utilizados por serem dispositivos de baixos custos operacionais, consegue-se relativa precisão que atende a maioria de protótipos de pesquisas para o meio acadêmico e amadores, facilidade de desenvolvimento, replicação e adaptação com pequenas e médias soluções. A Figura 18 lista alguns dos microcontroladores mais utilizados em projetos de IoT.

Figura 18 - Exemplo de microcontroladores



Fonte: Internet (2025).

ESP32

O microcontrolador ESP32 foi escolhido para a implementação deste projeto devido às amplas funcionalidades integradas, como conectividade Wi-Fi e Bluetooth, além da presença de conversores analógico-digital (ADC), digital-analógico (DAC) e modulação por largura de pulso (PWM). Desenvolvido pela Espressif Systems, o ESP32 tem se destacado como uma plataforma robusta e versátil no desenvolvimento de soluções em Internet das Coisas (IoT), sendo especialmente útil em aplicações de agricultura de precisão, que demandam o monitoramento contínuo de variáveis ambientais (SANTOS *et al.*, 2022; PEREIRA & ROCHA, 2021).

O ESP32 tem sido amplamente adotado em contextos acadêmicos e científicos pela versatilidade, custo acessível e capacidade de integração com múltiplos sensores, tornando-o ideal para projetos educacionais e de pesquisa aplicada, dada a capacidade de realizar medições em tempo real e transmitir dados via redes Wi-Fi e Bluetooth. Sua compatibilidade com plataformas como Arduino IDE, MicroPython e Espressif IDF facilita a prototipagem rápida e o desenvolvimento de soluções inovadoras e funcionais.

Estudos demonstram que o uso do ESP32 em projetos educacionais promove um aprendizado mais ativo e interdisciplinar, fortalecendo o vínculo entre teoria e prática (Oliveira & Silva, 2021; Rocha *et al.*, 2022). Ele permite a prototipagem rápida e a implementação de soluções reais em projetos de pesquisa, especialmente na área de IoT e agricultura urbana, facilitando o aprendizado de programação embarcada.

Uma das razões para a popularidade do ESP32 é o baixo custo, a flexibilidade de pinagem, pouco consumo de energia, ampla rede de suporte, além de compatível com

a plataforma de desenvolvimento Arduino IDE, além da integração com ampla variedade de sensores. A depender do modelo, o microcontrolador pode apresentar até 34 pinos GPIO (General Purpose Input/Output), que podem ser configurados para múltiplas funções, como entrada/saída digital, leitura analógica, comunicação I2C (ALMEIDA *et al.*, 2023). A Tabela 17, lista as funções dos pinos da ESP32.

Tabela 16 - Principais tipo de pinos e funções do ESP32.

Tipo de Pino	Função
GPIOs	Pinos de uso geral para entrada e saída de sinais digitais.
ADC (Analog In)	Entrada analógica (0–3.3V). Úteis para ler sensores como de umidade.
DAC (Analog Out)	Saída analógica. Pode gerar sinais analógicos (ex: controle de LED).
PWM	Modulação por largura de pulso, usada para motores, LEDs e outra dispositivos
I ² C (SDA/SCL)	Comunicação com sensores como pH, temperatura, entre outros.
SPI	Comunicação com módulos de memória, displays.
UART (TX/RX)	Comunicação serial, como com o computador ou sensores seriais.
EN	Pino de enable/reset (deve estar em HIGH para o chip funcionar).
GND	Terra (Ground), essencial para o circuito.
3V3 / 5V	Pinos de alimentação. Normalmente opera com 3.3V .

Fonte: Autor (2025).

Sensores

Os sensores são os elementos centrais do sistema de monitoramento e controle ambiental, pois são responsáveis pela coleta contínua e precisa de dados essenciais que

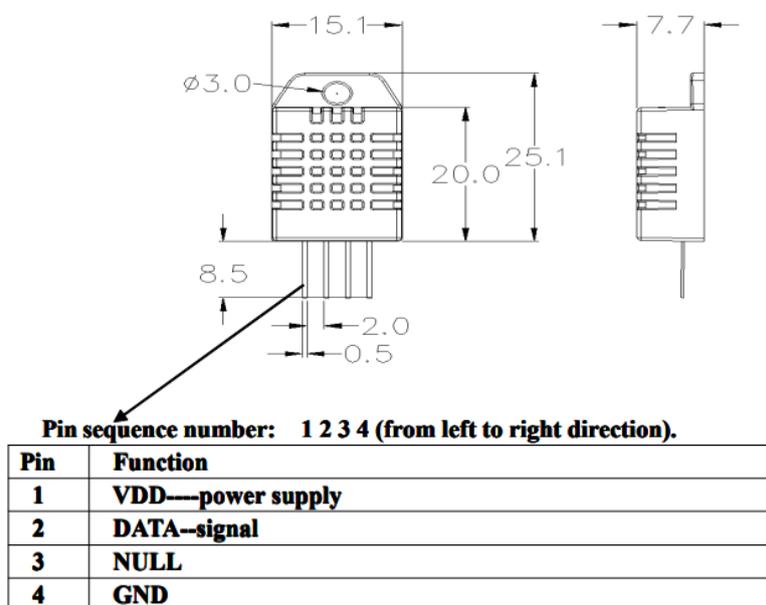
influenciam diretamente no desenvolvimento saudável e eficiente das hortaliças cultivadas em ambientes residenciais.

No projeto, os sensores são instrumentos indispensáveis para garantir a eficiência, o controle e a sustentabilidade da produção de hortaliças em residências. Eles constituem a ponte entre o ambiente físico e o sistema digital, viabilizando o conceito de agricultura inteligente adaptada ao contexto urbano.

Sensor de Humidade e Temperatura

O DHT22 (Figura 19) é um sensor digital básico e de baixo custo para temperatura e umidade. Ele utiliza um sensor capacitivo de umidade e um termistor para medir o ar ambiente e envia um sinal digital para o pino de dados (não são necessários pinos de entrada analógicos). É bastante simples de usar, todavia requer um controle cuidadoso do tempo para capturar os dados. Sua leitura tem intervalo de 2 (dois) segundos. A Figura 19, demonstra o diagrama de pinagem do sensor DHT22.

Figura 19 - Pinagem do sensor DHT22



Fonte: Internet (2025).

A Tabela 18 apresenta as especificações técnicas do sensor DHT22, amplamente utilizado em projetos de automação e Internet das Coisas (IoT) para monitoramento de temperatura e umidade. Abaixo está uma descrição detalhada dos parâmetros listados:

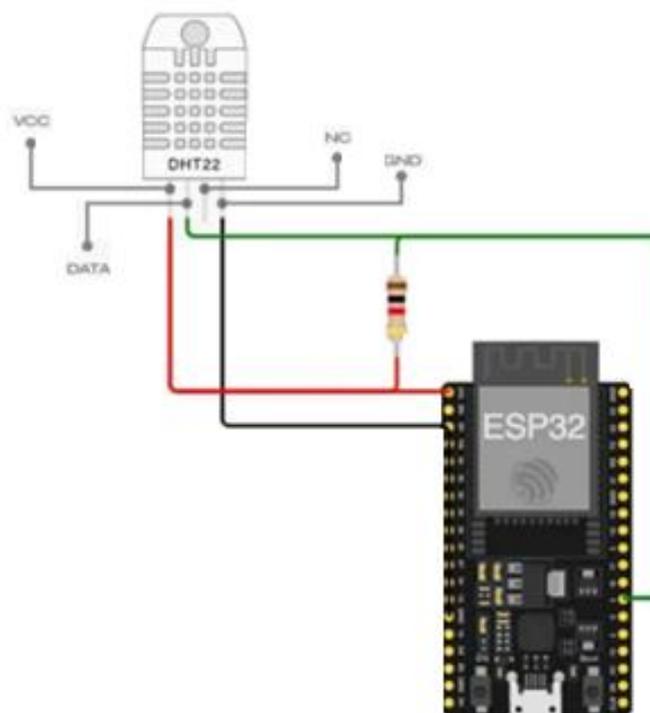
Tabela 17 - Características do Sensor DHT22.

Parâmetro	Especificação
Tensão de operação	3.3V a 6V
Corrente em repouso	2.5 μ A
Faixa de temperatura	-40 a +80°C
Precisão temperatura	$\pm 0.5^\circ\text{C}$
Faixa de umidade	0% a 100% RH
Precisão umidade	$\pm 2\%$ a $\pm 5\%$ RH
Frequência de amostragem	1 leitura a cada 2 segundos
Interface de comunicação	Digital, protocolo proprietário de 1 fio
Tempo de resposta	~ 2 segundos
Dimensões típicas	28 mm x 12 mm x 10 mm

Fonte: Autor (2025).

O Sensor DHT22 (Figura 20) foi alimentado diretamente a partir da ESP32 através do pino 1 com uma voltagem de 5 V. Houve a necessidade de utilizar um resistor de 10 k Ω com a finalidade de estabilizar o sinal de dados, garantir nível alto por padrão, evitar ruídos e falhas de comunicação, para que a voltagem adequada chegada no sensor fosse exatamente de 3,5 k Ω . O pino 4 serviu como terra e o pino 2 do sensor foi utilizado para entrada de dados, sendo conectado diretamente no pino 32 do ESP32.

Figura 20 - DHT22 com a ESP32.



Fonte: Internet (2025).

Sensor de temperatura da água

Sensores de temperatura da água são dispositivos fundamentais para sistemas que envolvem o monitoramento e controle térmico de meios líquidos, especialmente em aplicações como a agricultura de precisão, cultivos hidropônicos e sistemas de irrigação automatizada baseados em Internet das Coisas (IoT). Esses sensores fornecem dados em tempo real que são essenciais para manter condições ideais de cultivo, garantir a qualidade da água e prevenir falhas relacionadas a variações térmicas. A Tabela 19 apresenta algumas características técnicas do sensor de temperatura utilizado no projeto,

Estudos indicam que a faixa ideal de temperatura para a solução nutritiva está entre 18°C e 24°C, para o cultivo da alface, promovendo maior absorção de nutrientes, crescimento saudável e prevenindo a proliferação de microrganismos patogênicos (FURLANI, 1998; SILVA *et al.*, 2021).

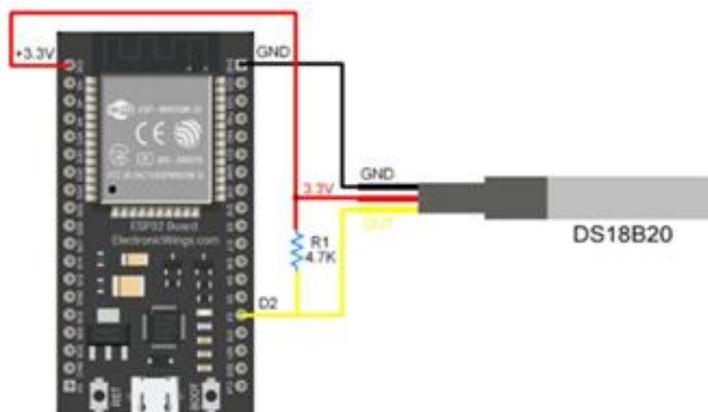
Tabela 18 - Características técnicas do sensor DS18B20.

Característica	Descrição
Interface	Comunicação digital via protocolo 1-Wire
Tensão de operação	3,0 V a 5,5 V
Faixa de medição	-55°C a +125°C
Precisão típica	±0,5°C (na faixa de -10°C a +85°C)
Resolução configurável	9 a 12 bits
Tempo de conversão	Até 750 ms (resolução de 12 bits)
Modo de alimentação	Externa (recomendado) ou por parasita (uso do mesmo fio de dados)
Comunicação com ESP32	Usa apenas 1 pino GPIO digital + resistor de 4,7 kΩ
Identificação única	Cada sensor possui um código de 64 bits único (permite múltiplos no mesmo fio)
Aplicações comuns	Cultivo hidropônico, aquários, sistemas HVAC, monitoramento ambiental

Fonte: Internet (2025)

Esse dispositivo teve a finalidade de realizar o monitoramento térmico em tempo real, medindo a temperatura da solução nutritiva e enviado dados para microcontrolador ESP32 no contexto do sistema de automação, que transmitiu esses dados para a plataforma de IoT. Ele foi alimentado com uma fonte de 3,5 V, e seu pino de dados foi conectado ao pino 13 da ESP32. A Figura 21 apresenta como esse contexto foi implementado.

Figura 21 - Sensor DS18B20 utilizado no projeto.



Fonte: Internet (2025)

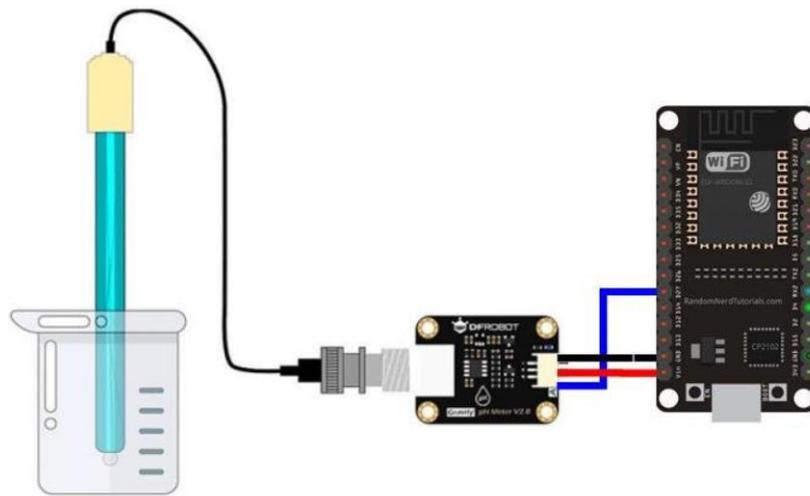
Sensor de PH (potencial hidrogeniônico)

O sensor de pH é um componente fundamental em sistemas de cultivo hidropônico e agricultura de precisão, sendo utilizado para monitorar o potencial hidrogeniônico da solução nutritiva. Esse parâmetro indica a concentração de íons hidrogênio (H^+) em solução, determinando seu grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade. O controle preciso do pH é essencial, pois afeta diretamente a disponibilidade dos nutrientes às raízes das plantas, influenciando a absorção eficiente e, por conseguinte, o desenvolvimento fisiológico saudável das culturas (Resh, 2013).

O uso de sensores eletrônicos de pH em conjunto com sistemas de Internet das Coisas (IoT) permite o monitoramento contínuo e em tempo real desse parâmetro, possibilitando intervenções rápidas e automatizadas em casos de variações fora da faixa ideal. Isso não apenas otimiza o cultivo, mas também reduz perdas e melhora a sustentabilidade do sistema (SILVA et al., 2020).

O sensor utilizado no projeto foi o PH-4502 (Figura 22) com um eletrodo Sonda Bnc. O sensor de pH foi integrado ao ESP32 junto a outros sensores para enviar dados para a plataforma IoT. Esse cenário permitirá a visualização em tempo real dos parâmetros do cultivo, alertas em caso de pH fora da faixa ideal e Tomada de decisão para correção (manual ou automatizada). A pinagem que foi utilizada foi GPIO 34.

Figura 22 - Uso do sensor de PH x ESP32.



Fonte: Internet (2025).

Sensor de Distância

O sensor de distância LiDAR (Light Detection and Ranging) é uma tecnologia de medição remota baseada na emissão de pulsos de luz laser e na medição do tempo que essa luz leva para refletir em um objeto e retornar ao sensor. Essa técnica permite a determinação precisa da distância entre o sensor e uma superfície, mesmo em condições ambientais variáveis (WEHR & LOHR, 1999).

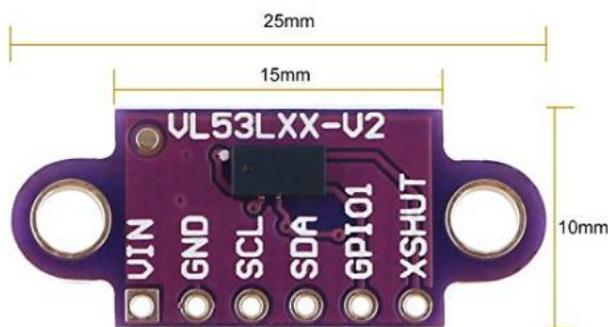
No contexto desse projeto, o sensor LiDAR (Figura 23) tem se destacado pela alta precisão, baixo tempo de resposta e capacidade de operar sem contato físico com a planta, foi utilizado para monitorar o crescimento do cultivo da alface ao ser integrado ao ESP32, na medida que foi posicionado de forma vertical e conseguiu medir o deslocamento vertical do crescimento da folhagem, indicando, em centímetros, o estágio de crescimento da planta em tempo real.

Essa informação pode ser armazenada em nuvem, processada por algoritmos de tomada de decisão e utilizada para acionar intervenções automatizadas, como ajustes de iluminação ou nutrientes, contribuindo para o manejo agrônômico eficiente e sustentável (ZAHNG & KOVACS, 2012).

O Sensor de distância utilizado no projeto foi VL53LXX. O VL53LXX (incluindo variações como VL53L0X, VL53L1X e VL53L3CX) é um sensor de distância

ToF (Time-of-Flight) desenvolvido pela STMicroelectronics. Sua tecnologia é baseada na medição do tempo que a luz infravermelha (emitida por um laser VCSEL – Vertical Cavity Surface Emitting Laser) leva para atingir um objeto e retornar ao receptor interno do sensor.

Figura 23 - Dimensões do sensor VL53LXX.



Fonte: Internet (2025).

O VL53LXX funciona por meio da interface I2C, presente na maioria das placas e microcontroladores encontrados no mercado, como ESP32. A Tabela 20, lista as funções dos principais parâmetros desse sensor.

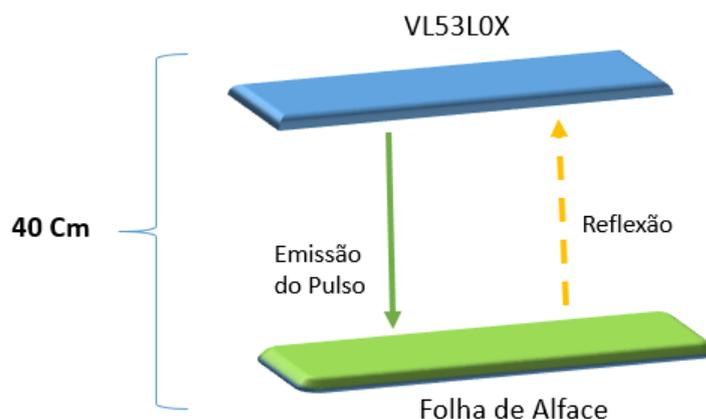
Tabela 19 - Características do sensor VL53LOX.

Parâmetro	VL53L0X (exemplo)
Tecnologia	Time-of-Flight (ToF)
Faixa de medição típica	30 mm até 2.000 mm (com boa iluminação)
Precisão	~1 mm (dependendo da distância e luz)
Interface de comunicação	I2C (padrão), compatível com microcontroladores como o ESP32
Tempo de resposta	< 33 ms (modo rápido)
Tensão de operação	2.6 V a 3.5 V (regulável)
FOV (campo de visão)	~25°
Tamanho físico	4.4 mm × 2.4 mm × 1.0 mm

Fonte: Autor (2025)

A Figura 24 representa o funcionamento de um sensor de distância VL53L0X aplicado à medição da distância do cultivo. No diagrama, o sensor é ilustrado como um retângulo azul rotulado "VL53L0X", posicionado acima de um retângulo verde identificado como cultivo, com separação de 40 cm entre eles. Uma seta verde contínua aponta do sensor para a folha, indicando a "Emissão do Pulso", enquanto uma seta amarela tracejada retorna da folha para o sensor, representando a "Reflexão". Essa configuração ilustra o princípio de funcionamento do sensor, que emite um pulso de luz e mede o tempo de retorno após a reflexão na superfície da folha, permitindo calcular a distância com precisão.

Figura 24 – Diagrama explicativo do sensor de distância.



Fonte: Autor (2025).

O sensor VL53L0X funciona com base na tecnologia ToF (Time of Flight), ou tempo de voo, utilizando pulsos de laser infravermelho (VCSEL - *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*) para medir distâncias com alta precisão. O ToF mede o tempo que a luz leva para ir e voltar.

- a. 1º Etapa: O sensor a partir do laser emite pulsos de luz infravermelha invisível;
- b. 2º Etapa: O pulso de laser viaja pelo ar até atingir a folha de alface;
- c. 3º Etapa: A luz é refletida de volta ao sensor;
- d. 4º Etapa: O VL53L0X mede com precisão o tempo que o pulso leva para sair do sensor, refletir no objeto e retornar.

Como a velocidade da luz é conhecida, o sensor calcula a distância com base nesse tempo:

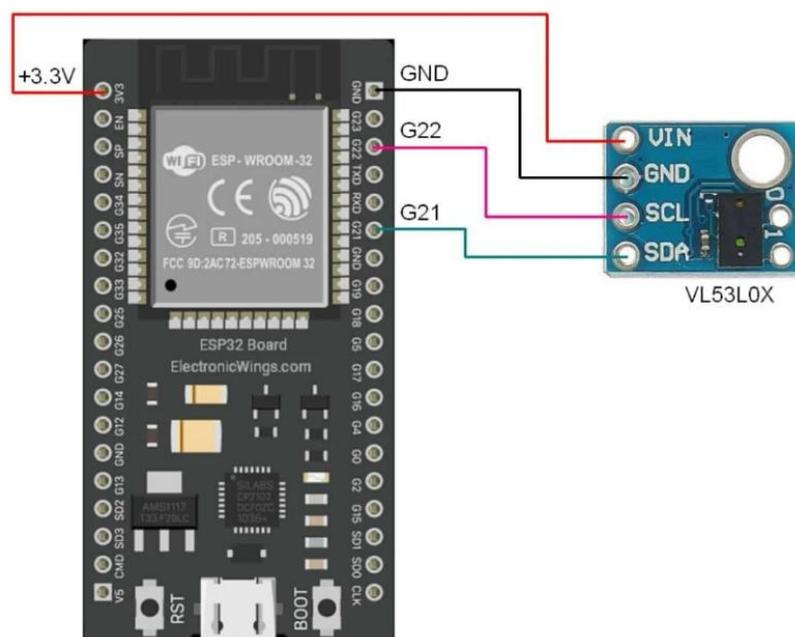
$$\text{Distância} = \frac{\text{velocidade da luz} \times \text{tempo de voo}}{2}$$

Essa fórmula é comumente usada em sistemas de medição baseados em tempo de voo, como radares ou sensores lidar. Aqui está o que cada termo representa:

1. Velocidade da luz: Aproximadamente $3 \times 10^8 \times 10^8$ metros por segundo.
2. Tempo de voo: O tempo que a luz (ou outro sinal) leva para ir até um objeto e voltar.
3. Divisão por 2: Porque o tempo de voo inclui ida e volta, então divide-se por 2 para obter apenas a distância de ida.

O Pino 25 e 26 da ESP32, foi conectado à serial data (SDA) e Serial Clock (SCL), respectivamente. A figura 10, traz um exemplo de como foi configurado o VL53L0X na EXP32 (Figura 24).

Figura 25 - Uso do Sensor VL53L0X x ESP32.



Fonte: Internet (2025).

APÊNDICE C - INVESTIMENTO DO PROJETO

A Tabela 19, consolida os custos do projeto. É apresentado a lista dos principais materiais necessários para a construção do projeto.

Tabela 20 - Tabela de Valores dos principais componentes.

Item	Sensor	Modelo	Valor (R\$)
1	Placa Esp32 Wifi / Bluetooth 30 Pinos	ESP8266 NodeMCU	39,99
2	VL5310x Sensor Distancia Laser Ranging Lidar Tof I2c	GY-VL53L	28,00
3	Sensor De Temperatura E Umidade	DHT22	42,91
4	Sensor De Temperatura - Ds18b20 - À Prova D'água	DS18B20	18,11
5	Eletrodo Sensor Ph Phmetro Sonda Bnc Universal- Novo	Eletrodo PH	111,10
6	Caixa Térmica De 30 Litros - 1 Unidade (Isopor)		48,90
7	Flex Azul + Flex Vermelho Plantpar 5000 Litros - Folhosas	Plantpar	299,90
8	6x Luminária Sobrepor Led 40w 120cm Tubular Slim 6500k Cor Branco 127/220V	Linear	87,59
Total			R\$ 676,50

Fonte: Autor (2025).

1. Microcontrolador (ESP8266): Serve como o "cérebro" do sistema, realizando leituras dos sensores e enviando dados para a nuvem via Wi-Fi.
2. Sensores (VL53L0X, DHT22, DS18B20, Eletrodo pH): Realizam o monitoramento ambiental necessário para o cultivo — temperatura, umidade, pH e crescimento da planta.
3. Caixa térmica: Isola o sistema para testes simulando controle de ambiente.
 4. Plantpar e luminárias: Simulam as condições ideais de cultivo urbano (solo e luz controlada).

5. O item de maior valor individual é o substrato Plantpar (R\$ 299,90), que representa 44% do custo total, destacando a importância de um meio adequado para cultivo.
6. O custo total (R\$ 676,50) é viável para um protótipo acadêmico, mantendo a proposta de acessibilidade e escalabilidade.

Para apresentar a tabela de preços do MVP, foram realizadas consultas em um dos sítios mais consultados no Brasil para a compra dos mais diversos produtos, o Mercado Livre (<https://produto.mercadolivre.com.br/>). Os preços estão muito focados nos componentes eletrônicos utilizados para montar o MVP.

Outros custos não foram considerados, como utilização da IDE do Arduino e a plataforma de IoT Cloud. No caso desta última, a conta criada utilizou um plano grátis que possui algumas limitações, mas suficiente para o propósito deste trabalho.

Os valores que não foram listados, referem-se a compra de fios para fazer conectores, protoboards, relês, resistores, fita isolante. Esses elementos paravelmente devem encarecer os valores que foram apresentados em até 15%.