

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

GABRIEL BOSCO DIAS
GUSTAVO VAZ AUGUSTO FELICIANO
LUCAS BASTOS PEREIRA
LUCAS PEREIRA DE ANDRADE XAVIER

Controlador de temperatura em estufas, aplicado a sistemas de agricultura de precisão

SÃO PAULO
2026

CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE

GABRIEL BOSCO DIAS
GUSTAVO VAZ AUGUSTO FELICIANO
LUCAS BASTOS PEREIRA
LUCAS PEREIRA DE ANDRADE XAVIER

Controlador de temperatura em estufas, aplicado a sistemas de agricultura de precisão

Projeto tecnológico elaborado como
requisito parcial para conclusão do Curso
Superior de Tecnologia em Automação
Industrial

Orientador: Eder Terceiro

SÃO PAULO

2026

FOLHA DE APROVAÇÃO

GABRIEL BOSCO DIAS
GUSTAVO VAZ AUGUSTO FELICIANO
LUCAS BASTOS PEREIRA
LUCAS PEREIRA DE ANDRADE XAVIER

Controlador de temperatura em estufas, aplicado a sistemas de agricultura de precisão

Projeto tecnológico elaborado como
requisito parcial para conclusão do Curso
Superior de Tecnologia em Automação
Industrial

Orientador: Eder Terceiro

Aprovado em: ___/___/___

BANCA EXAMINADORA

Prof. Me. Eder Terceiro
Instituição: FATEC ITAQUERA

Assinatura: _____
Data ___/___/___

Prof. Me. Daiane Gonçalves Ribeiro
Instituição: FATEC ITAQUERA

Assinatura: _____
Data ___/___/___

Prof. Me. Marco Aurélio Feriotti
Instituição: FATEC ITAQUERA

Assinatura: _____
Data ___/___/___

DEDICATÓRIA

Dedicamos este Trabalho de Conclusão de Curso a nossas famílias, pelo suporte dado durante todo o cumprimento do curso, aos professores, pela disposição e empenho em nos passarem o seu conhecimento, aos orientadores, pela mentoria oferecida durante a elaboração do trabalho e a todos que puderam contribuir conosco durante os anos de realização do curso.

RESUMO

O aumento da utilização da cannabis medicinal no tratamento de doenças tem ampliado a demanda pelo cultivo doméstico por pacientes que possuem autorização judicial para produzir seu próprio medicamento. Entretanto, a manutenção das condições ambientais necessárias ao desenvolvimento da planta exige monitoramento constante e conhecimento técnico, dificultando a obtenção de resultados consistentes. Diante desse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um controlador automático para cultivo protegido de cannabis medicinal, baseado no Déficit de Pressão de Vapor (VPD). O sistema integra sensores e atuadores capazes de monitorar e controlar temperatura, umidade e iluminação, mantendo o ambiente dentro das faixas adequadas para o desenvolvimento da planta. Para isso foi desenvolvido o protótipo de um controlador aplicado a uma estufa de pequeno porte para aquisição de dados ambientais e acionamento automático dos dispositivos de controle. A utilização do VPD como parâmetro de referência fundamenta-se em estudos que relacionam seu controle ao aumento da atividade fotossintética, da eficiência no uso da água e da produtividade agrícola. Resultados reportados na literatura indicam incrementos superiores a 17% na produção de biomassa e 12% na produtividade em ambientes com VPD controlado. O protótipo desenvolvido foi capaz de realizar o controle preciso de VPD utilizando exaustores e um desumidificador, além de apresentar também viabilidade econômica, atendendo a expectativa de custo estipulada na pesquisa de campo.

Palavras-chave: Controlador; Estufa; Automático; VPD; Cannabis

ABSTRACT

The increasing use of medical cannabis in the treatment of diseases has expanded the demand for home cultivation by patients who have judicial authorization to produce their own medicine. However, maintaining the environmental conditions required for proper plant development demands constant monitoring and technical knowledge, making it difficult to achieve consistent results. In this context, this study proposes the development of an automatic controller for protected medical cannabis cultivation based on Vapor Pressure Deficit (VPD). The system integrates sensors and actuators capable of monitoring and controlling temperature, humidity, and lighting, maintaining the environment within the optimal ranges for plant growth. To achieve this, a controller prototype was developed and applied to a small-scale greenhouse for environmental data acquisition and automatic activation of control devices. The use of VPD as the reference parameter is supported by studies that associate its control with increased photosynthetic activity, improved water-use efficiency, and enhanced agricultural productivity. Results reported in the literature indicate increases of more than 17% in biomass production and 12% in crop productivity in environments where VPD is properly controlled. The developed prototype was able to perform precise VPD control using exhaust fans and a dehumidifier, while also demonstrating economic feasibility by meeting the cost expectations established in the field survey.

Keywords: Controller; Greenhouse; Automatic; VPD; Cannabis.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tabela do valor de VPD ideal	27
Figura 2 - Tabela de VPD.....	28
Figura 3 - Estrutura de um microcontrolador	31
Figura 5 - Gráfico do porte da produção agrícola	39
Figura 6 - Gráfico da presença de estufas no cultivo	40
Figura 7 - Gráfico das funcionalidades mais importantes	40
Figura 8 - Gráfico do tempo dedicado ao cultivo	41
Figura 9 - Gráfico do índice de uso de sistemas automatizados nos cultivos	41
Figura 10 - Gráfico do nível de interesse em ser usuário piloto	42
Figura 11 - Gráfico da faixa de preço estimada pelos entrevistados	42
Figura 12 - ESP32 Montado em placa de testes	43
Figura 13 - Sensor SHT31	44
Figura 14 - Sensor LDR.....	44
Figura 15 - Módulo de relé 3V3	45
Figura 16 - Desumidificador D6.....	45
Figura 17 - Microventilador 120X120X38 GC	46
Figura 18 - Display LCD 20X4	47
Figura 19 - Modulo RTC DS3231	47
Figura 20 - Fluxograma de etapas de desenvolvimento do projeto	50
Figura 21 - Diagrama de blocos	53
Figura 22 - Modelo 3D da estufa.....	55
Figura 23 - Desenho 2D da porta da estufa.....	55
Figura 24 - Desenho 2D da estufa.....	56
Figura 25 - Estufa montada	57
Figura 26 - Página 1 do diagrama elétrico.....	58
Figura 27 - Página 2 do diagrama elétrico.....	59
Figura 28 - Página 3 do diagrama elétrico.....	59
Figura 29 - Página 4 do diagrama elétrico.....	60
Figura 30 - Fluxograma do programa	62
Figura 31 - Protótipo finalizado do sistema de automação microclimática durante o período de testes laboratoriais.	66
Figura 32 - Interface física em display LCD exibindo os parâmetros locais de controle na fase vegetativa.	67
Figura 33 - Monitoramento da temperatura em condições normais de operação.	68
Figura 34 - Resposta do sistema ao aumento induzido de temperatura.....	69
Figura 35 - Monitoramento da umidade em condições normais de operação.....	70

Figura 36 - Resposta do sistema ao aumento induzido de umidade.	71
Figura 37 - Resposta do sistema à redução e estabilização da umidade após a atuação dos componentes.	72
Figura 38 - Comportamento do VPD em regime estável de operação.	73
Figura 39 - Oscilações controladas do VPD durante o processo de ajuste ambiental.	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i>
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
AVP	Pressão de vapor real
CBD	Canabidiol
CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
CSI	<i>Camera Serial Interface</i>
DAC	<i>Digital-to-Analog Converter</i>
GPIOs	<i>General Purpose Input/Output</i>
IC	<i>Inter-Integrated Circuit</i>
IAC	Incidente de Assunção de Competência
IDEs	<i>Integrated Development Environments</i>
LDR	<i>Light Dependent Resistor</i>
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
NIDA	Instituto Nacional de Abuso de Drogas Americano
PL	Projeto de Lei
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
RPM	Rotações por minuto
RTC	<i>Real Time Clock</i>
SCL	<i>Serial Clock</i>
SDA	<i>Serial Data</i>
SVP	Vapor de saturação
STJ	Superior Tribunal de Justiça
THC	Tetrahydrocannabinol
UR	Umidade Relativa do Ar
UV	Ultravioleta
VPD	<i>Vapor Pressure Deficit</i>

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivo Geral	14
1.2.1 Objetivos específicos.....	14
2. REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1 Histórico e legislação.....	16
2.2 Fundamentação teórica.....	18
2.2.1 O Custo e a origem da barreira econômica.....	19
2.3 Parâmetros Críticos para o cultivo	19
2.3.1 Temperatura	19
2.3.2 Umidade relativa do ar	21
2.3.3 Rendimento medicinal.....	22
2.4 Sistemas de controle.....	23
2.4.1 Controle de Temperatura (Aquecimento e Resfriamento).....	23
2.4.2 Controle de Umidade.....	24
2.4.3 Controle de Luminosidade.....	24
2.4.4 Déficit de Pressão de Vapor (VPD).....	25
2.5 Tecnologias Aplicadas ao Controle	29
2.5.1 Sensores de Temperatura e Umidade.....	30
2.5.2 Sensores de luminosidade.....	30
2.5.3 Microcontroladores.....	31
2.5.4 Atuadores	32
2.6 Benefícios da Utilização da Automação na Agricultura de Precisão.....	35
3. METODOLOGIA.....	37
3.1 Definições.....	37
3.1.1 Natureza do Projeto	38
3.2 Pesquisa de Validação.....	39
3.3 Materiais	43
3.3.1 Hardware	43

3.3.2 Software.....	48
3.3.3 Tabela de materiais	48
3.4 Procedimentos do projeto	49
4. DESENVOLVIMENTO	51
4.1 Arquitetura geral do sistema	51
4.2 Estrutura funcional do sistema	51
4.3 Arquitetura Mestre-Escravo.....	53
4.4 Projeto estrutural da estufa	54
4.5 Desenvolvimento dos Circuitos.....	58
4.6 Desenvolvimento do Software Embarcado	60
4.7 Programação do ESP32	63
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1 Testes e Validação do Protótipo.....	65
5.2 Desempenho do Sistema de Controle.....	67
5.3 Precisão das Medições e Estabilidade do VPD	72
5.4 Análise de Viabilidade Econômica	75
CONCLUSÃO.....	78
REFERÊNCIAS	82
APENDICE A – CÓDIGO FONTE DO CONTROLADOR DESENVOLVIDO	88

1. INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão consiste em um sistema de gestão agrícola que utiliza tecnologia e automação de processos para otimizar o uso de recursos, aumentar a produtividade e reduzir os impactos ambientais de um cultivo, como a emissão de gases, poluição da água e do solo e até mesmo o desmatamento (PIEROZAN *et al.*, 2018; SUNDMAEKER *et al.*, 2016).

A implementação desse tipo de sistema se baseia na utilização de um tratamento sob medida para cada parte da plantação, em vez de uma generalização de todas as medidas tomadas, dessa forma, os ajustes são feitos pontualmente em cada segmento da produção de acordo com suas necessidades específicas. Essa tecnologia vem contribuindo muito com o agronegócio, visto que ela ajuda o campo a funcionar de maneira mais eficiente, lucrativa e sustentável (ZHANG *et al.* 2002).

As tecnologias utilizadas na agricultura de precisão, em sua maioria, consistem no monitoramento e ajuste de variáveis ambientais, pois as condições climáticas são uma das principais causas de fracassos no meio agrícola. Para que esses ajustes possam ser realizados, sensores realizam uma coleta de dados, que são enviados para um controlador, que, com base em sua programação, será capaz de aplicar os ajustes necessários na plantação de forma localizada e precisa (ADAMCHUK *et al.*, 2004).

Um dos ambientes da agricultura onde mais se aplicam tecnologias de automação e controle de variáveis, são as estufas, estruturas usadas para criar um ambiente protegido e mais propício para o cultivo de plantas (SHAMSHIRI *et al.*, 2018).

Tendo conhecimento sobre automação industrial e sabendo o essencial sobre como um sistema de controle eficiente deve funcionar, esse projeto visa desenvolver um controlador capaz de medir e ajustar a temperatura e a umidade dentro de uma estufa para o cultivo de cannabis, utilizando o padrão de controle de Vapor Pressure Deficit (VPD), que otimiza o transporte de nutrientes e o crescimento saudável da planta, resultando em uma maior qualidade e rendimento ao final do cultivo (BAILLE *et al.*, 2006; KATSOULAS *et al.*, 2009).

Para que isso seja possível, será realizada a integração de diversos componentes eletrônicos, como microcontroladores, reles, sensores e displays, além do uso de protocolos de comunicação de redes, que juntos formarão um novo tipo de controlador de temperatura e umidade, que poderá

ser utilizado dentro de sistemas de agricultura de precisão, desde que o ambiente atenda as especificações necessárias para o funcionamento adequado do controlador.

1.1 Justificativa

O cenário agrícola contemporâneo é caracterizado pela crescente necessidade de processos produtivos que conciliem eficiência, sustentabilidade e elevado controle das variáveis ambientais. Essa demanda torna-se ainda mais evidente no contexto do cultivo de *Cannabis sativa* para fins medicinais, uma vez que essa espécie apresenta alta sensibilidade a fatores ambientais, como temperatura, umidade relativa e luminosidade, os quais influenciam diretamente sua fisiologia, produtividade e composição fitoquímica (RODRÍGUEZ-YZQUIERDO *et al.*, 2021).

Nesse sentido, a agricultura de precisão disponibiliza um conjunto de práticas essenciais para cultivos que exigem rastreabilidade e padronização, requisitos fundamentais para a produção medicinal. Tecnologias de automação, sensoriamento e controle tornam possível otimizar o uso de recursos, promover estabilidade microclimática e reduzir variações indesejáveis entre ciclos de cultivo, contribuindo para maior eficiência e segurança agroindustrial. Estudos recentes confirmam que sistemas automatizados baseados em sensores ambientais são capazes de elevar o rendimento das culturas ao mesmo tempo em que reduzem desperdícios e promovem o uso racional de insumos (ZHANG *et al.*, 2002).

Além disso, pesquisas indicam que estufas inteligentes, quando equipadas com sistemas de controle adaptativo e monitoramento contínuo, podem reduzir significativamente o consumo energético e hídrico, atingindo índices superiores a 60% de economia em determinados cenários (YANG *et al.*, 2013). Essa redução é especialmente relevante no cultivo de *Cannabis medicinal*, em que o controle ambiental rigoroso é indispensável para evitar estresses que comprometam a taxa de crescimento, influenciando diretamente no desenvolvimento da planta.

A automação aplicada a estufas, portanto, não apenas melhora a eficiência produtiva, mas também garante a padronização dos parâmetros de cultivo, requisito indispensável para a reprodutibilidade científica e para aplicações farmacêuticas. Tecnologias de controle ambiental já vêm sendo utilizadas em setores como horticultura e floricultura de alto valor agregado, demonstrando sua versatilidade e relevância para sistemas em que a qualidade final depende de condições ambientais estáveis (ZHOU; WANG; CHEN, 2022).

Nesse contexto, o desenvolvimento de um controlador dedicado, integrando sensores ambientais de alta precisão, atuadores e algoritmos de controle, constitui uma solução tecnológica estratégica. A adoção de microcontroladores como o ESP32 e sensores confiáveis, como o SHT31, possibilita a criação de um sistema de baixo custo e elevado desempenho, capaz de monitorar e ajustar variáveis críticas, especialmente o VPD, parâmetro amplamente reconhecido como determinante para o equilíbrio hídrico e para o desempenho fisiológico da Cannabis (RODRÍGUEZ-YZQUIERDO et al., 2021).

Dessa forma, esse projeto justifica-se pela convergência entre necessidade científica, demanda tecnológica e relevância social, uma vez que o cultivo de Cannabis medicinal encontra-se em expansão no Brasil e no mundo, exigindo métodos que garantam segurança, qualidade, padronização e sustentabilidade. O desenvolvimento de um controlador automatizado para estufas representa, portanto, uma contribuição significativa tanto para o avanço acadêmico quanto para o setor produtivo, alinhando-se às necessidades contemporâneas da agricultura de precisão aplicada a plantas medicinais.

1.2 Objetivo Geral

Desenvolver um controlador dedicado ao monitoramento e ao controle automático das variáveis ambientais de uma estufa, de modo a proporcionar condições ideais para o cultivo. O projeto contempla a integração de sensores, atuadores e algoritmos de controle, sendo inicialmente direcionado a uma estufa de pequeno porte, voltada ao uso doméstico e ao cultivo de cannabis, com fins medicinais, com investimento estimado em aproximadamente R\$ 3.000,00.

1.2.1 Objetivos específicos

Em função deste objetivo geral, esse trabalho propõe abordar mais 3 objetivos específicos, sendo eles:

- Integrar sensores para o monitoramento das variáveis ambientais da estufa. Pretende-se realizar a seleção, calibração e integração de sensores de temperatura e umidade, com objetivo de obter medições precisas e confiáveis dentro da estufa, permitindo o acompanhamento em tempo real das condições ambientais necessárias para o cultivo.

- Avaliar custos e viabilidade de produção, por meio de uma análise econômica do projeto, com a elaboração de uma lista de materiais, estimativas de custo unitário e recomendações para fabricação em larga escala. Este objetivo permitirá avaliar a viabilidade de aplicação comercial da solução desenvolvida.

- Projetar e implementar a estrutura física da estufa e a disposição dos componentes eletrônicos, garantindo a adequada circulação de ar, posicionamento dos sensores e eficiência na atuação dos dispositivos de controle ambiental.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Esse capítulo tem como objetivo apresentar e analisar os principais conceitos, teorias, estudos e tecnologias relacionados a agricultura de precisão e ao cultivo da cannabis medicinal no Brasil, reunindo informações relevantes de livros, artigos científicos, normas técnicas e publicações acadêmicas. Nesta seção, serão discutidos os fundamentos teóricos necessários para a compreensão do projeto, bem como os métodos, aplicações práticas, avanços tecnológicos e pesquisas já desenvolvidas na área, permitindo embasar tecnicamente o desenvolvimento do trabalho e demonstrar a importância de tecnologias de agricultura de precisão no contexto acadêmico e profissional.

2.1 Histórico e legislação

A Cannabis sativa é uma planta que vem sendo estudada a muitos anos e que se tornou uma grande opção terapêutica no século XXI devido ao seu caráter farmacológico. (GROSSO, 2020).

Um dos primeiros eventos de apoio a utilização da Cannabis dentro da indústria ocorreu em 1920, quando o cultivo da cannabis foi incentivado para uso dentro das indústrias de papel, tecidos, farmacêutica e automobilística, sendo a base de um combustível desenvolvido pela Ford (CAMPOS, 2020).

Até os anos 1980, o Instituto Nacional de Abuso de Drogas Americano (NIDA) focava apenas nos efeitos deletérios da cannabis, bloqueando estudos sobre seus efeitos benéficos (GROSSO, 2020). No entanto, nos anos 1990, a planta ganhou destaque com a descoberta do sistema endocanabinóide, seus receptores e neurotransmissores, levando a um entendimento sobre a modulação da dor, analgesia e ciclos de sono (CAMPOS, 2020).

O marco inicial da situação atual da Cannabis no Brasil foi o advento da Lei de Drogas (Lei nº 11.343/2006), em seu Artigo 2º, de parágrafo único, que prevê que a União pode autorizar o plantio, a cultura e a colheita da cannabis, para fins medicinais ou científicos, em local e prazo predeterminados (MARTINS; POSSO, 2023).

A regulamentação no Brasil, desde 2015, tem sido impulsionada pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), ano em que, por meio da Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) nº 3, a ANVISA atualizou a lista de substâncias de controle especial, incluindo o canabidiol (CBD)

e por meio da RDC nº 17 definiu, os critérios para que pessoas físicas pudessem importar produtos à base de CBD para tratamento médico (MARTINS; POSSO, 2023.; ANVISA, 2015).

Atualmente a RDC nº 327/2019 é a que está em vigor, esta resolução estabelece os requisitos para a fabricação, importação, comercialização, prescrição e fiscalização de produtos de Cannabis para fins medicinais. Ela exige que os produtos tenham predominantemente CBD e não mais que 0,2% de Tetrahydrocannabinol (THC), com exceção para casos que exigem cuidados paliativos, exclusivamente para pacientes sem alternativas terapêuticas e em situações clínicas irreversíveis ou terminais (MARTINS; POSSO, 2023).

Nesse contexto surgiu o Projeto de Lei (PL) nº 399/2015, projeto de lei que propôs alterar a Lei de Drogas para viabilizar o plantio e a comercialização de fármacos que contenham extratos ou partes da planta Cannabis (MARTINS; POSSO, 2023; CONGRESSO NACIONAL, 2015).

Esse PL foi aprovado pela comissão especial da Câmara em 2021, mas o trâmite foi postergado por recurso, e ele aguarda votação em plenário (MARTINS; POSSO, 2023).

A aprovação do cultivo no Brasil traria uma grande contribuição não só para a indústria farmacêutica, mas também para a indústria agrícola, com a geração de empregos e, crucialmente, a redução dos custos da matéria-prima dos fármacos para os pacientes (MARTINS; POSSO, 2023).

Há estimativas de que, se o uso fosse legalizado de forma mais ampla, o Brasil poderia arrecadar até R\$ 5,6 bilhões em tributos (MARTINS; POSSO, 2023).

A ausência de uma política pública abrangente para o cultivo e produção de derivados medicinais da cannabis resultou em forte judicialização. Pacientes e associações têm recorrido ao Judiciário para garantir o direito de importar produtos ou realizar o autocultivo com salvo-conduto ou Habeas-corpus. O número de ações judiciais cresceu mais de 4.000% na última década, refletindo a carência de regulamentação específica e o alto custo de importação (MARTINS; POSSO, 2023).

O Superior Tribunal de Justiça (STJ) (2025), por meio do Incidente de Assunção de Competência (IAC) n.º 16, reconheceu a necessidade de o Estado brasileiro instituir uma política pública nacional de manejo da cannabis medicinal, contemplando tanto o setor industrial quanto os arranjos associativos, que atualmente reúnem cerca de 90 mil pacientes (MARTINS; POSSO, 2023). Essa decisão reflete o crescimento da demanda por tratamentos à base de cannabis e a necessidade de ampliar o acesso seguro e contínuo aos medicamentos derivados da planta. Nesse contexto, o cultivo doméstico autorizado judicialmente surge como uma alternativa para muitos

pacientes, especialmente diante dos elevados custos de aquisição dos produtos importados e das limitações de oferta existentes no mercado nacional.

2.2 Fundamentação teórica

A Cannabis possui diversas propriedades terapêuticas oriundas de compostos denominados canabinoides presentes em sua composição. Os principais canabinoides são o CBD e o Delta-9-tetrahydrocannabinol. A descoberta do sistema endocanabinóide, seus receptores tipo 1 e tipo 2, e neurotransmissores, ocorrida nos anos 1990, destacou a Cannabis na ciência, visto que, em nosso corpo, existem os endocanabinóides, que são similares aos canabinoides naturais estruturados na planta. O CBD e THC interagem com os receptores do nosso corpo tipo 1 e tipo 2, influenciando nos mecanismos que regulam o organismo (MARTINS; POSSO, 2023).

Entre as propriedades mais relevantes da Cannabis, destacam-se os efeitos anticonvulsivantes, amplamente estudados no tratamento de epilepsias refratárias, especialmente em crianças. Além disso, a planta apresenta uma ação anti-inflamatória, contribuindo para a redução de processos inflamatórios crônicos e alívio de sintomas relacionados a doenças autoimunes (MARTINS; POSSO, 2023).

Outro ponto relevante é o seu potencial analgésico, eficaz no controle da dor neuropática e em condições clínicas de difícil manejo com medicamentos convencionais. A Cannabis também apresenta efeitos ansiolíticos, auxiliando na redução da ansiedade e do estresse, e antipsicóticos, com resultados promissores em estudos voltados a distúrbios psiquiátricos, como a esquizofrenia (MARTINS; POSSO, 2023).

Adicionalmente, pesquisas apontam possíveis propriedades antitumorais, sugerindo que alguns canabinoides podem inibir o crescimento de determinadas células cancerígenas. Por fim, os compostos da Cannabis demonstram também efeitos neuro protetores, que podem contribuir para a preservação e recuperação das funções cerebrais em doenças neurodegenerativas, como Alzheimer e Parkinson. Assim, observa-se que a Cannabis medicinal, especialmente o CBD, possui um conjunto diversificado de ações terapêuticas, o que reforça seu potencial como alternativa complementar ou adjuvante em diversos tratamentos médicos (MARTINS; POSSO, 2023).

2.2.1 O Custo e a origem da barreira econômica

O alto custo está diretamente relacionado ao fato de que as empresas devem importar o insumo farmacêutico nas formas de derivado vegetal, fitofármaco, a granel ou produto industrializado (MARTINS; POSSO, 2023).

Pacientes com indicação médica para o emprego do CBD frequentemente precisam recorrer legalmente para solicitar e obter o medicamento para o tratamento das patologias (SPEZZIA, 2022; FUGII, 2022).

A principal solução discutida para a redução de custos e ampliação do acesso é a autorização do cultivo em território nacional (MARTINS; POSSO, 2023; Grecco, 2020).

2.3 Parâmetros Críticos para o cultivo

O controle adequado das variáveis ambientais no cultivo de cannabis é fundamental para garantir o desenvolvimento saudável da planta, maximizar a produtividade e assegurar a qualidade final do cultivo. Fatores como temperatura, umidade, luminosidade, ventilação, nível de CO₂, potencial hidrogeniônico (pH) e condutividade elétrica influenciam diretamente nos processos fisiológicos da planta, afetando seu crescimento, floração e concentração de compostos como canabinoides e terpenos. Dessa forma, o monitoramento e a automação dessas variáveis permitem maior estabilidade no ambiente de cultivo, redução de perdas, otimização de recursos e aumento da eficiência produtiva, tornando o processo mais seguro, padronizado e tecnologicamente controlado.

2.3.1 Temperatura

A temperatura é um dos principais fatores abióticos a serem controlados em um cultivo indoor, pois sua manutenção adequada influencia diretamente a saúde, o desenvolvimento e a produtividade das plantas (LUZ, 2022; BISNETA *et al.*, 2024).

Isso ocorre, pois, a taxa de fotossíntese de uma planta é positivamente afetada pelo aumento da temperatura até um limite de aproximadamente 35 °C, acima desse valor, ocorre uma queda acentuada na fotossíntese, comprometendo outros processos biológicos da planta. A temperatura

também está diretamente relacionada com a umidade relativa do ar, visto que, durante o dia, o aumento da temperatura tende a reduzir a umidade relativa do ar, cuja variação é influenciada pela evapotranspiração (LUZ, 2022; SILVA *et al.*, 2017).

Temperaturas ideais variam conforme a espécie, porém, de modo geral, em espécies de cultivo indoor, a temperatura recomendada varia entre 21 °C e 27 °C (FILGUEIRA, 2008; TRINDADE, 2024).

No caso da Cannabis, a temperatura ideal para o crescimento gira em torno de 20 a 30 °C, visto que temperaturas muito baixas ou muito altas podem afetar negativamente a produção de canabinoides (TRANCOSO *et al.*, 2022). Durante a fase vegetativa, o ideal é entre 24 °C e 26 °C, e na floração, entre 24 °C a 28 °C (CERVANTES, 2007; SALONER; BERNSTEIN, 2021).

Altas temperaturas podem ocasionar o pendoamento precoce das plantas, o que resulta na diminuição do ciclo da cultura e torna as folhas mais rígidas. Já o calor excessivo pode levar à perda excessiva de água e contribuir para o surgimento de pragas e doenças (TRINDADE, 2024).

A temperatura em um ambiente indoor é diretamente influenciada pela cobertura e pelas condições ambientais externas, entretanto, ela deve apresentar um comportamento devidamente controlado para o desenvolvimento adequado das culturas, sendo um fator de extrema importância para a fisiologia e produtividade das plantas (ROMANINI *et al.*, 2010)

Do ponto de vista térmico, as estufas podem se comportar de maneira insatisfatória, pois geralmente apresentam temperaturas elevadas durante o dia, que são difíceis de mitigar apenas com ventilação natural, e, frequentemente, ocorrem temperaturas inferiores às críticas das plantas cultivadas à noite (SILVA *et al.*, 2017; TARASSI, 2000).

A luz e a nebulosidade também são fatores que influenciam a temperatura em ambientes indoor. Em dias claros, a temperatura do ar no interior da estufa geralmente é superior à verificada a céu aberto, apresentando diferenças que variam de 2 a 5 °C. Por outro lado, em dias nublados, as temperaturas internas e externas tendem a se aproximar muito, por vezes sem variação (SILVA *et al.*, 2017).

O material da estufa é outro fator que afeta o *status* em ambiente protegido, alterando significativamente os valores da temperatura máxima do ar. Um estudo comparativo entre diferentes coberturas demonstrou que o tipo de material é um fator determinante para o desempenho térmico (SILVA *et al.*, 2017). Nesse estudo, foi observado que estufas cobertas com filme transparente de baixa densidade (150 µm) ou com filme transparente, anti-gotejante e com

estabilização anti-UV (200 µm) registraram picos de temperatura mais elevados, atingindo 30 °C e 33 °C, respectivamente, em um determinado momento do dia (SILVA *et al.*, 2017). Em contraste, a estufa coberta com filme leitoso (150 µm de espessura) apresentou o melhor comportamento para as condições locais, mostrando uma curva de aumento de temperatura mais linear, gradual e menos agressiva, e não ultrapassando os 30 °C (atingindo um pico de 26 °C) (SILVA *et al.*, 2017).

Além de limitar o aquecimento diurno, o filme leitoso também proporcionou a melhor retenção de calor para as temperaturas mínimas, alcançando valores da ordem de 11 °C, um aspecto de fundamental importância, visto que temperaturas baixas podem ser um fator limitante para o cultivo em ambientes protegidos (SILVA *et al.*, 2017).

Em síntese, o controle preciso da temperatura em ambientes indoor é essencial, impactando diretamente o desenvolvimento, a saúde, a absorção de nutrientes e a qualidade dos compostos bioativos das culturas (LUZ, 2022; BISNETA *et al.*, 2024).

2.3.2 Umidade relativa do ar

A Umidade Relativa do Ar (UR) no interior de ambientes protegidos está diretamente relacionada à temperatura do ar. Em condições normais, a UR varia significativamente ao longo do dia, podendo oscilar de 30% a 100% (SILVA *et al.*, 2017).

Durante o período noturno, a UR geralmente atinge valores elevados em função da queda da temperatura, que reduz a tensão de saturação de vapor de água. Com a elevação da temperatura do ar durante o dia, a UR diminui, podendo atingir valores muito baixos, como 20%. Essa queda acentuada é causada pelo aumento exponencial da pressão de saturação de vapor com o aquecimento, em contraste com a pequena variação da pressão atual de vapor ao longo do dia (PEZZOPANE *et al.*, 1996).

Os valores de umidade relativa são influenciados pela evapotranspiração. A não renovação do ar no interior da estufa, somada à incidência dos primeiros raios solares que aumentam a evapotranspiração, pode acentuar a elevação da pressão atual de vapor pela manhã, resultando em pressões de vapor atuais maiores no interior do que a céu aberto. Quando ocorre o excesso de umidade na estufa, pode haver a condensação na cobertura, o que reduz a transmitância da radiação

solar. Situação que pode ser solucionada com uma abertura de cortinas laterais de uma estufa, gerando uma queda rápida nesses valores de pressão de vapor (PEZZOPANE *et al.*, 1996).

A UR influencia processos vitais como a transpiração, o crescimento, a fecundação das flores e a ocorrência de doenças. Além disso, a umidade está intrinsecamente vinculada ao equilíbrio hídrico das plantas (ROMANINI *et al.*, 2010).

Uma alta umidade diminui a transpiração, retarda o crescimento vegetativo e, em plantas reprodutivas, pode dificultar a fecundação das flores ao impedir o desprendimento adequado do pólen ou formar conglomerados. Os altos valores de UR, frequentemente associados a altas temperaturas, ainda criam condições extremamente favoráveis para a ocorrência e proliferação de doenças e patógenos, como fungos e bactérias. Para a maioria das doenças fúngicas, a UR ideal para o desenvolvimento deve estar acima de 80%. O controle da UR é, portanto, uma estratégia fitossanitária, pois o manejo correto pode diminuir a incidência de doenças e levar à redução no uso de defensivos agrícolas. No cultivo de Cannabis, por exemplo, a umidade deve ser mantida entre 40% e 50% na floração e 50% e 70% na fase de muda, para evitar oídio e outras doenças fúngicas, garantindo a regulação da transpiração influenciando diretamente na qualidade da biomassa. (TRANCOSO *et al.*, 2022; CERVANTES, 2007).

2.3.3 Rendimento medicinal

O rendimento medicinal da Cannabis sativa está intrinsecamente ligado à qualidade e à quantidade dos compostos bioativos produzidos, especialmente os canabinoides, como o CBD. Estes compostos, juntamente com terpenos e flavonoides, são sintetizados nas glândulas tricomas presentes nas flores femininas e são essenciais para as propriedades terapêuticas da planta (AZEVEDO, 2025; HESAMI *et al.*, 2023).

A produção de Cannabis para fins farmacêuticos exige o controle rigoroso dos fatores ambientais para garantir um produto uniforme, consistente e seguro, em conformidade com os padrões de qualidade e eficácia exigidos para medicamentos (FIORENTINO *et al.*, 2024; SMALL, 2017; HERRERA *et al.*, 2024).

O cultivo em ambientes fechados oferece o maior controle sobre variáveis críticas como temperatura, umidade, luz e ventilação, sendo o método preferencial para garantir altos padrões de qualidade e consistência na produção (AZEVEDO, 2025)

A composição química e o rendimento da Cannabis sativa são altamente influenciados pela manipulação precisa dos fatores abióticos, como luz, temperatura, umidade e nutrição (TRANCOSO *et al.*, 2022; AZEVEDO, 2025).

Após a colheita, que deve ocorrer no ponto ideal de maturação dos tricomas, os processos de secagem e cura são fundamentais para preservar os canabinoides e terpenos aromáticos, garantindo a potência e a qualidade do produto (CANNATROL, 2019). O controle adequado de temperatura, umidade e ventilação durante essas etapas evita a degradação dos compostos ativos e o desenvolvimento de fungos indesejados. Além disso, a cura realizada de forma gradual contribui para a melhoria do sabor, aroma e estabilidade química do produto.

Em suma, o cultivo indoor permite a manipulação precisa dessas variáveis, o que é fundamental para a produção consistente e segura de Cannabis medicinal, permitindo que o perfil químico da planta seja direcionado para as necessidades terapêuticas específicas. Essa previsibilidade no controle ambiental também favorece a padronização dos lotes produzidos, aspecto essencial para aplicações medicinais. Dessa forma, o sistema contribui diretamente para a confiabilidade e rastreabilidade do processo produtivo. (FIORENTINO *et al.*, 2024; TRANCOSO *et al.*, 2022).

2.4 Sistemas de controle

A climatização de estufas agrícolas é essencial para garantir o crescimento saudável das plantas, especialmente em regiões de clima instável. Esse processo envolve o controle de temperatura, umidade, ventilação, luminosidade e irrigação para manter condições adequadas ao cultivo. Sistemas automatizados, baseados em microcontroladores ou Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), permitem o controle dessas variáveis, aumentando a eficiência energética e reduzindo a intervenção manual (OSORES *et al.*, 2018; JÚNIOR, 2016).

2.4.1 Controle de Temperatura (Aquecimento e Resfriamento)

O controle de temperatura em uma estufa é um dos fatores mais críticos para a manutenção do equilíbrio térmico interno. Diferentes métodos podem ser aplicados para aquecimento, sistemas convectivos e condutivos são amplamente empregados. (OSORES *et al.*, 2018)

Os sistemas convectivos podem operar por combustão direta ou indireta, aquecendo o ar que circula internamente, enquanto os sistemas condutivos utilizam resistências elétricas ou tubulações de água quente enterradas para aquecer o solo. Já os sistemas radiantes aquecem o ambiente por meio de trocas de calor entre um fluido térmico e o ar interno da estufa, sendo essa uma opção eficiente para grandes áreas (JÚNIOR, 2016).

Em contrapartida, o resfriamento e a ventilação são fundamentais para evitar o superaquecimento em dias de alta radiação solar. O uso de ventoinhas (*coolers*) em sistemas automatizados de pequeno porte é uma solução prática para remover o excesso de calor. A ventilação pode ocorrer de forma natural, através de aberturas laterais e superiores, ou mecânica, com ventiladores de admissão ou exaustão. Além disso, técnicas de resfriamento evaporativo, que utilizam a evaporação da água para reduzir a temperatura, e o uso do princípio da termoconvecção (entrada de ar frio pelas partes inferiores e saída do ar quente pelas superiores) também são aplicadas para promover trocas térmicas eficientes (JÚNIOR, 2016).

2.4.2 Controle de Umidade

O controle da umidade relativa do ar e da irrigação é outro fator decisivo no desempenho de uma estufa agrícola. Sistemas de umidificação ativa podem ser implementados com o uso de umidificadores automáticos acionados por relés quando a umidade cai abaixo de um limite definido, garantindo condições adequadas ao desenvolvimento das plantas. Além disso, dispositivos como painéis evaporadores e bicos nebulizadores de alta pressão são utilizados para aumentar a umidade por meio da dispersão de microgotas de água, que se misturam ao ar, reduzindo a temperatura e elevando a umidade interna. (JÚNIOR, 2016).

2.4.3 Controle de Luminosidade

A luminosidade é um dos parâmetros mais críticos do cultivo, pois influencia diretamente os processos fisiológicos da planta, como a fotossíntese, a absorção de nutrientes e a produção de canabinoides. Diferentemente de outras culturas, a cannabis apresenta um comportamento fotoperiódico bem definido, sendo classificada como planta de dia curto, ou seja, sua floração é induzida pela redução do número de horas de luz diária (SILVA *et al.*, 2021).

Durante a fase vegetativa, o desenvolvimento ideal ocorre sob um fotoperíodo de aproximadamente 18 horas de luz e 6 horas de escuridão, o que estimula o crescimento foliar e o fortalecimento da estrutura da planta. Já na fase de floração, o fotoperíodo é reduzido para 12 horas de luz e 12 horas de escuridão contínua, condição que desencadeia a produção de flores e, conseqüentemente, de compostos medicinais como o CBD. A interrupção acidental do período de escuridão, mesmo por curtos intervalos, pode provocar hermafroditismo, estresse lumínico ou atraso na floração, comprometendo a qualidade e o rendimento da produção (SILVA *et al.*, 2021).

Em ambientes automatizados, o controle de luminosidade é realizado por sistemas de iluminação artificial baseados em lâmpadas LED de espectro ajustável, capazes de emitir comprimentos de onda específicos (azul, vermelho e infravermelho) conforme a fase do ciclo da planta. Esses sistemas podem ser integrados a sensores de luminosidade e temporizadores controlados por microcontroladores, como o ESP32, permitindo alternar entre modos diurnos e noturnos automaticamente. Além da intensidade e duração da luz, a qualidade espectral também exerce papel importante. A luz azul ,400–500 nm, estimula o crescimento vegetativo e a compactação da planta, enquanto a luz vermelha ,600–700 nm, favorece o florescimento e o aumento da biomassa floral. Assim, o sistema de controle luminoso deve considerar não apenas o tempo de exposição, mas também a composição espectral e a uniformidade da iluminação dentro da estufa (SILVA *et al.*, 2021).

Por fim, a automação do fotoperíodo da cannabis medicinal garante reprodutibilidade e precisão nos experimentos e cultivos controlados, além de permitir ajustes dinâmicos conforme o estágio de desenvolvimento da planta. Isso reduz a influência de fatores externos como o clima e a variabilidade sazonal e assegura condições ideais de cultivo indoor, fundamentais para fins farmacêuticos e de pesquisa (SILVA *et al.*, 2021).

2.4.4 Déficit de Pressão de Vapor (VPD)

O VPD é uma variável ambiental fundamental no controle do microclima de estufas agrícolas e exerce papel direto nos processos fisiológicos da *Cannabis sativa*. Ele representa a diferença entre a pressão de vapor de saturação do ar (quantidade máxima de vapor que o ar pode conter) e a pressão de vapor real (quantidade de vapor presente). Em termos práticos, o VPD indica o potencial de evaporação da água das folhas para o ar, sendo um dos principais reguladores da

transpiração, fotossíntese e absorção de nutrientes (BAILLE *et al.*, 2006; KATSOULAS *et al.*, 2009).

Valores adequados de VPD permitem que os estômatos (estruturas responsáveis pela troca gasosa) permaneçam abertos, garantindo a entrada de CO₂ e a transpiração eficiente, que é essencial para o transporte de nutrientes pelo xilema e o crescimento saudável da planta. Por outro lado, valores muito altos de VPD promovem uma perda excessiva de água e o fechamento estomático, levando a estresse hídrico e redução da fotossíntese; já valores muito baixos podem causar baixa transpiração e acúmulo de umidade, favorecendo doenças fúngicas (BAILLE *et al.*, 2006; KATSOULAS *et al.*, 2009).

Pesquisas demonstram que controlar o VPD dentro de faixas ideais aumenta significativamente a biomassa e o rendimento das plantas, como observado em cultivos de tomate, nos quais a redução do VPD de 1,4 para 0,8 kPa aumentou o rendimento em mais de 12%, comportamento que está diretamente relacionado ao equilíbrio entre a taxa de transpiração e a absorção de água e nutrientes, influenciando processos fisiológicos como a fotossíntese e a abertura estomática (BAILLE *et al.*, 2006; KATSOULAS *et al.*, 2009).

Esse mesmo princípio se aplica à Cannabis, cuja fisiologia responde de forma sensível a pequenas variações de temperatura e umidade relativa. Durante o cultivo da cannabis, as faixas ideais de VPD variam conforme o estágio fenológico da planta. Em fases iniciais, como a germinação e o crescimento vegetativo, valores mais baixos de VPD são recomendados para favorecer o desenvolvimento estrutural, enquanto na floração, níveis mais elevados contribuem para a produção de flores mais densas e ricas em compostos ativos. Dessa forma, o monitoramento e controle preciso do VPD tornam-se estratégias essenciais para maximizar a produtividade e garantir a qualidade final da cultura, como pode ser observado nas figuras 1 e 2 a seguir.

Figura 1 - Tabela do valor de VPD ideal

VALORES DE VPD RECOMENDADOS PARA O CULTIVO DE CANNABIS, POR ETAPA DO CULTIVO			
Estágio de Crescimento	Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	VPD Recomendado (kPa)
Germinação	24-26	70-80	0,8-1,0
Clones	24-26	70-80	0,8-1,0
Vegetativo	24-26	50-70	0,8-1,2
Pré-floração	24-28	40-60	1,0-1,4
Floração	24-28	40-50	1,2-1,6
Final da Floração	24-28	40-45	1,2-1,8

Fonte: KAYAMIND (2025)

- Fase vegetativa: entre 0,8 e 1,1 kPa, para estimular a transpiração e o crescimento foliar vigoroso;
- Início da floração: entre 1,0 e 1,4 kPa, equilibrando o transporte de nutrientes e o controle de umidade;
- Final da floração: entre 1,2 e 1,6 kPa, favorecendo a taxa de crescimento saudável, além de reduzir o risco de mofo nas inflorescências.

Figura 2 - Tabela de VPD

VALORES DE VPD RECOMENDADOS PARA O CULTIVO DE CANNABIS, POR TEMPERATURA													
TEMPERATURA		UMIDADE RELATIVA											
C°	F°	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%	80%	85%	90%
15	59	1.11	1.02	0.97	0.85	0.77	0.68	0.60	0.51	0.43	0.34	0.26	0.17
16	61	1.18	1.09	1.00	0.91	0.82	0.73	0.64	0.55	0.45	0.36	0.27	0.18
17	63	1.26	1.16	1.06	0.97	0.87	0.77	0.68	0.58	0.48	0.39	0.29	0.19
18	64	1.34	1.24	1.13	1.03	0.93	0.83	0.72	0.62	0.52	0.41	0.31	0.21
19	66	1.43	1.32	1.21	1.10	0.99	0.88	0.77	0.66	0.55	0.44	0.33	0.22
20	68	1.52	1.40	1.29	1.17	1.06	0.93	0.82	0.70	0.58	0.48	0.35	0.23
21	70	1.62	1.49	1.37	1.24	1.12	0.99	0.87	0.75	0.62	0.50	0.37	0.25
22	72	1.72	1.59	1.45	1.32	1.19	1.06	0.92	0.79	0.66	0.53	0.40	0.26
23	73	1.82	1.68	1.54	1.40	1.26	1.12	0.98	0.84	0.70	0.56	0.42	0.28
24	75	1.94	1.79	1.64	1.49	1.34	1.19	1.04	0.89	0.75	0.60	0.45	0.30
25	77	2.06	1.90	1.74	1.58	1.42	1.27	1.11	0.95	0.79	0.63	0.47	0.32
26	79	2.18	2.02	1.85	1.68	1.51	1.34	1.18	1.01	0.84	0.67	0.50	0.34
27	81	2.32	2.14	1.96	1.78	1.60	1.43	1.25	1.07	0.89	0.71	0.53	0.36
28	82	2.46	2.27	2.08	1.89	1.70	1.51	1.32	1.13	0.94	0.76	0.57	0.38
29	84	2.60	2.40	2.20	2.00	1.80	1.60	1.40	1.20	1.00	0.80	0.60	0.40
30	86	2.76	2.54	2.33	2.12	1.91	1.70	1.48	1.27	1.06	0.85	0.64	0.42
31	88	2.92	2.69	2.47	2.24	2.02	1.80	1.57	1.35	1.12	0.90	0.67	0.45
32	90	3.09	2.85	2.61	2.38	2.14	1.90	1.66	1.43	1.19	0.95	0.71	0.48
33	91	3.27	3.02	2.76	2.51	2.26	2.01	1.76	1.51	1.26	1.01	0.7	0.50
34	93	3.46	3.19	2.92	2.66	2.39	2.13	1.86	1.59	1.33	1.06	0.80	0.53
35	95	3.65	3.27	3.09	2.81	2.53	2.25	1.97	1.69	1.40	1.12	0.84	0.56

Fonte: Cultlight

■ Propagação/ Germinação
■ Pré-floração/ Vegetativo
■ Floração/ Final da floração

Fonte: KAYAMIND (2025)

O controle preciso do VPD, seja por sistemas automatizados de ventilação, nebulização ou supervisórios baseados em sensores, é essencial para maximizar a produtividade e a qualidade da biomassa, uma vez que mantém as plantas em um estado fisiológico ideal, otimizando o uso de água, a eficiência fotossintética e o metabolismo primário e secundário. Assim, o manejo inteligente do VPD representa um dos pilares da agricultura de precisão aplicada à cannabis medicinal, promovendo não apenas maior rendimento, mas também estabilidade e padronização na produção de princípios ativos (BAILLE *et al.*, 2006; KATSOULAS *et al.*, 2009).

2.5 Tecnologias Aplicadas ao Controle

O avanço das tecnologias embarcadas e dos sistemas de automação tem proporcionado melhorias significativas no monitoramento e controle de variáveis ambientais em estufas agrícolas. A utilização de sensores precisos e controladores programáveis permite manter a temperatura e a umidade em níveis ideais, favorecendo o crescimento das plantas e reduzindo o desperdício de recursos, como energia e água. Essa integração de hardware e software é a base para a agricultura de precisão, que busca aumentar a produtividade e a eficiência por meio da coleta e análise de dados em tempo real (SILVA *et al.*, 2023).

A automação de estufas tem como principal objetivo mitigar os desafios inerentes à gestão desse tipo de cultivo, notadamente aqueles relacionados ao controle de variáveis ambientais críticas, como a radiação solar, a umidade e a temperatura. Ao implementar a automação, as tarefas de controle que seriam tradicionalmente executadas de forma manual passam a ser realizadas por um sistema automático, liberando tempo para que o agricultor se dedique a outras atividades. Essa substituição do trabalho manual pela tecnologia reduz significativamente a preocupação com a perda de produtividade, decorrente de falhas humanas ou da ausência de monitoramento constante. Dessa forma, a tecnologia de automação contribui para a redução de erros operacionais e otimiza a alocação de mão de obra. (SILVA *et al.*, 2023).

O sistema desenvolvido é formado por módulos de leitura, que integram sensores de umidade relativa do ar e temperatura. Esses módulos são responsáveis pela aquisição contínua de dados ambientais e estão conectados a uma unidade central de controle, responsável pelo processamento das informações. Essa arquitetura modular possibilita a distribuição dos sensores pela estufa, otimizando a coleta de dados e garantindo maior confiabilidade nas medições. Além disso, o sistema pode ser expandido com a inclusão de novos sensores e atuadores, permitindo maior flexibilidade e adaptação a diferentes condições de cultivo. Dessa forma, torna-se possível implementar estratégias automatizadas de controle ambiental, aumentando a eficiência do processo produtivo e reduzindo a necessidade de intervenções manuais (SILVA *et al.*, 2023).

2.5.1 Sensores de Temperatura e Umidade

Na agricultura moderna, a dependência de métodos empíricos ou de experiências passadas tornou-se inviável. Diante dos padrões climáticos imprevisíveis e da crescente demanda por maiores rendimentos e por práticas sustentáveis, os sensores inteligentes emergiram como ferramentas indispensáveis para o manejo agrícola. Tais dispositivos são cruciais, este termo designa componentes sensíveis a diferentes formas de energia, seja ela luminosa, térmica ou cinética. A função essencial desses dispositivos é relacionar as informações de uma grandeza a ser medida, como temperatura, umidade ou pressão, e converter essas grandezas em sinais elétricos passíveis de processamento. (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2020).

Os sensores de temperatura e umidade são peças fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de automação em estufas, pois a coleta desses dados é crucial para que os atuadores, como as ventoinhas ou exaustores e as bombas de irrigação, sejam acionados quando necessário, mantendo o ambiente controlado (OLIVEIRA, 2024).

2.5.2 Sensores de luminosidade

O *Light Dependent Resistor* (LDR), é um dispositivo semicondutor eletrônico composto por dois terminais, cuja resistência elétrica varia de acordo com a intensidade luminosa incidente sobre sua superfície, de maneira quase linear. Trata-se de um componente não polarizado, permitindo a circulação de corrente elétrica em ambos os sentidos (MENDES JÚNIOR; STEVAN JUNIOR, 2013)

O princípio físico por trás do seu funcionamento é a fotocondutividade, um fenômeno que ocorre quando a intensidade de luz sobre um material é alterada, resultando na variação da condutividade do material. O material que constitui a superfície sensível do LDR é o Arsenieto de Gálio (MENDES JÚNIOR; STEVAN JUNIOR, 2013). Quando a luz incide sobre este material, as partículas de luz liberam elétrons, o que, por sua vez, provoca a alteração da sua resistividade (OLIVEIRA, 2024).

O principal material utilizado em sua fabricação é o Sulfeto de Cádmi, também conhecido como cápsula de Sulfeto de Cádmi, disposto de forma a maximizar a incidência de luz sobre o material sensível (MENDES JÚNIOR; STEVAN JUNIOR, 2013). Esse conjunto é protegido por

um invólucro transparente para quase todas as cores do espectro visível, o que favorece a absorção luminosa. Além do Sulfeto de Cádmio, o LDR também pode ser construído a partir de outros compostos semicondutores (OLIVEIRA, 2024).

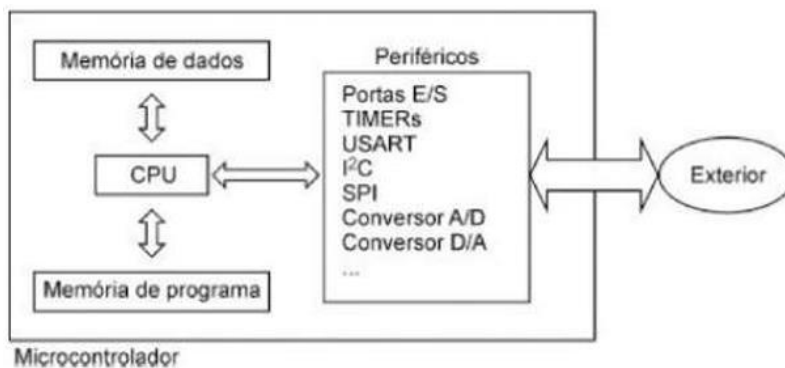
2.5.3 Microcontroladores

Os microcontroladores surgiram a partir da modernização dos circuitos digitais, devido à redução de custos e a miniaturização dos componentes, foi possível obter uma evolução em termos de hardware, substituindo a lógicas das portas digitais pelo trabalho conjunto de processador e software (SANTOS, 2020).

Os microcontroladores surgiram em meados da década de 1970, desenvolvido por uma equipe da *Texas Instruments*, nos primeiros modelos, a programação era realizada diretamente em código de máquina, composta por dígitos binários. Esse processo era extremamente complexo e exigia elevado nível técnico, além de demandar grande investimento de tempo e custo para o desenvolvimento de aplicações (LEIBSON, 2022)

A Figura 3 representa a estrutura simplificada de um microcontrolador, destacando seus principais blocos funcionais e a interação com dispositivos externos.

Figura 3 - Estrutura de um microcontrolador



Fonte: MIYADAIRA (2009)

A utilização de um microcontrolador em um sistema de estufa emerge como uma solução eficaz para mitigar problemas que impactam o desenvolvimento de plantas. Essa abordagem se justifica porque a precisão superior de um sistema computacional, em relação à intervenção humana, permite que a automação atinja seu objetivo primordial: a eliminação de erros

operacionais que poderiam resultar em déficits na produtividade ou na qualidade final (CARVALHO *et al.*, 2009).

2.5.4 Atuadores

Os atuadores são dispositivos responsáveis por converter sinais elétricos de controle em ação física, desempenhando papel fundamental em sistemas automatizados. No contexto do controle ambiental de estufas, esses componentes são responsáveis por ajustar as variáveis de temperatura, umidade e ventilação de acordo com os valores monitorados pelos sensores.

A atuadores são componentes cruciais em sistemas de automação, como em estufas, pois são responsáveis por executar as ações físicas necessárias para regular as variáveis climáticas e garantir as condições ideais de cultivos. Em um sistema automatizado de estufa, os atuadores são acionados com base nos valores lidos por sensores e comparados com limites definidos pelo usuário (*setpoints*) (SILVA *et al.*, 2023).

No projeto desenvolvido, são utilizados *coolers*, empregados como exaustores, e um desumidificador de ar, responsáveis por manter o equilíbrio térmico e a umidade do ambiente. Os ventiladores promovem a circulação do ar e auxiliam na dissipação do calor interno, evitando o superaquecimento das plantas e garantindo a uniformidade da temperatura dentro da estufa. Já o desumidificador atua na remoção do excesso de umidade do ar, prevenindo o surgimento de fungos e doenças que podem comprometer o desenvolvimento das culturas (CORTES, 2017).

É de extrema importância o controle dessas variáveis, pois de acordo com Cortes (2017), uma estufa com umidade relativa muito alta também pode apresentar problemas de condensação, e com isso gerar problemas com fungos ou respingos.

Ademais, existem equipamentos capazes de remover a umidade do ar, os chamados desumidificadores (CORTES, 2017).

2.5.4.1 Relé

Os relés são dispositivos eletromecânicos responsáveis por realizar a comutação de circuitos de potência a partir de sinais de controle de baixa tensão. (GALAN, 2025).

Através do módulo, é possível realizar o controle *on/off* dos atuadores, garantindo a operação automática dos equipamentos conforme as necessidades do ambiente. Além disso, o relé atua como interface de isolamento elétrico, assegurando a proteção do circuito de controle e a eficiência na comutação das cargas (CORTES, 2017; SILVA *et al.*, 2023)

2.5.4.2 Coolers

Os *coolers*, frequentemente referidos como ventiladores ou exaustores em sistemas de estufa, são atuadores cruciais para a regulação térmica e ventilação do ambiente, essenciais, garantindo que a temperatura se mantenha nas condições ideais de cultivo (SANTOS *et al.*, 2017).

Essa estratégia de controle com o *cooler* permite uma estabilização mais rápida da resposta do sistema, o que é vital para culturas sensíveis a variações de temperatura (SANTOS *et al.*, 2017).

No contexto do presente projeto, os *coolers* foram empregados como exaustores, integrando o sistema de controle automatizado de temperatura e umidade da estufa. Sua função é garantir a ventilação forçada do ambiente, removendo o ar quente acumulado e permitindo a entrada de ar mais frio, o que contribui para a estabilização térmica e para a uniformidade da umidade relativa do ar. O acionamento dos *coolers* é realizado por meio de um módulo relé de quatro canais, controlado pelo microcontrolador ESP32, que possibilita o funcionamento automático no modo *on/off*, de acordo com os parâmetros ambientais definidos no sistema.

2.5.4.3 Desumidificadores

Os desumidificadores são atuadores essenciais para o controle rigoroso da umidade relativa do ar em estufas. Classificados como equipamentos capazes de remover a umidade do ar. Sua função é fundamental para manter os níveis de umidade dentro da faixa ideal (CORTES, 2017)

Adicionalmente, Cortes (2017) destaca que a utilização dos desumidificadores é crucial para manter os níveis de umidade dentro da faixa ideal, evitam problemas como a redução da transpiração ou a condensação, que pode causar doenças fúngicas nas plantas. O princípio de funcionamento de um desumidificador baseia-se no uso de uma bomba de calor que tem a função de resfriar o ar até o ponto de orvalho para que o vapor de água se condense. Após esse processo, o ar é reaquecido e devolvido ao ambiente na temperatura original.

2.5.4.4 Iluminação

A iluminação é um fator abiótico de suma importância para o desenvolvimento saudável das plantas dentro de uma estufa, atuando diretamente em processos biológicos como a fotossíntese, na estrutura, orientação e reprodução das culturas (SILVA *et al.*, 2023).

O objetivo do controle de iluminação é prolongar a luz do dia ou compensar a iluminação natural inadequada. Além disso, a iluminação artificial adequada pode trazer melhorias em termos de segurança e produtividade. (LEIBSON, 2022; SILVA *et al.*, 2023; CORTES, 2017)

Entretanto, devido à grande diversidade de espectros e potências de luminárias disponíveis no mercado e à dependência das necessidades específicas de cada cultura, o escopo deste projeto prevê apenas a disponibilização de um ponto de atuação (tomada) controlado pelo sistema. Essa abordagem visa oferecer flexibilidade ao usuário, permitindo que o cliente selecione e instale o modelo de luminária mais adequado às suas exigências agronômicas, seja para aumento de produtividade ou para a segurança da estufa.

2.5.4.5 Ambiente de desenvolvimento integrado (IDE)

Conforme Margolis (2011), o IDE é a interface essencial para a programação de microcontroladores. Ele viabiliza a edição e a compilação do código, transformando-o em instruções executáveis que um microcontrolador processa, além de gerenciar sua gravação no microprocessador.

Os IDEs desempenham um papel crucial no processo de desenvolvimento *de software*, visto que centralizam um conjunto abrangente de ferramentas. Seu intuito é otimizar as diversas etapas da construção do *software*, englobando desde a edição de código até os testes e a depuração. (BARROS, 2025).

Segundo Barros (2025), a diversidade de IDEs disponíveis no mercado constitui uma complexidade para que os desenvolvedores selecionem a ferramenta mais apropriada às suas necessidades. Portanto, a escolha da IDE adequada depende do tipo de aplicação e do microcontrolador utilizado. Entre as diversas opções disponíveis, destacam-se a IDE Arduino, o PlatformIO e o Visual Studio Code.

Segundo Sombrio (2021) o Arduino IDE, é um programa de computador onde o usuário pode escrever programas, conhecidos como *sketches*, utilizando uma linguagem de programação baseada em C/C++ e na sintaxe do Processing. A IDE Arduino é uma das mais populares no desenvolvimento de projetos embarcados e educacionais, por apresentar uma interface simples e intuitiva. Souza et al. (2011) diz que, a IDE do arduino utiliza a linguagem de programação baseada em C/C++ e oferece um ambiente integrado que facilita a escrita.

O PlatformIO é descrito como uma ferramenta multi-plataforma, multi-arquitetura e multi-*framework* profissional para sistemas embarcados (PLATFORMIO, 2025).

O Visual Studio Code é um editor de código-fonte gratuito, multiplataforma e de código aberto, desenvolvido pela Microsoft (TECNODIGITAL, 2025).

A escolha entre as IDEs citadas, como Arduino IDE, PlatformIO e Visual Studio Code, depende das necessidades e dos requisitos específicos de cada projeto, bem como da familiaridade do usuário com a ferramenta. O Arduino IDE destaca-se pela facilidade de utilização e configuração, características que favorecem o desenvolvimento de aplicações embarcadas. Por outro lado, o PlatformIO oferece recursos mais avançados para gerenciamento de bibliotecas e organização de projetos, enquanto o Visual Studio Code apresenta maior flexibilidade por meio de extensões e personalizações. Considerando os objetivos deste trabalho, a compatibilidade com o microcontrolador ESP32 e a necessidade de um ambiente de desenvolvimento simples e eficiente, optou-se pela utilização do Arduino IDE para a implementação do sistema.

2.6 Benefícios da Utilização da Automação na Agricultura de Precisão

A automação aplicada à agricultura de precisão tem se tornado uma ferramenta indispensável para o controle eficiente de variáveis ambientais em cultivos protegidos, como as estufas. O uso de sistemas automatizados permite o monitoramento e o ajuste em tempo real de parâmetros fundamentais, como temperatura, umidade, ventilação e iluminação. Tais tecnologias ampliam o controle operacional e a eficiência na gestão de recursos, promovendo ganhos expressivos em produtividade e sustentabilidade (SILVA *et al.*, 2023).

Os benefícios da implementação de sistemas automatizados são múltiplos, abrangendo desde a melhoria da produtividade e qualidade dos produtos até a otimização de custos e o aumento da sustentabilidade da produção (SILVA *et al.*, 2023).

A automação garante um controle total do ambiente de produção, o que é fundamental para o sucesso das culturas, especialmente as sensíveis às variações climáticas (SILVA *et al.*, 2023).

A utilização da automação auxilia nas condições de Cultivo Ideais, uma vez que o controle rigoroso de variáveis como temperatura, umidade e luminosidade permite o melhor desenvolvimento do plantio (SANTOS *et al.*, 2017).

Em resumo, a automação na agricultura de precisão, aliada a uso de tecnologias de controle como microcontroladores, permite um controle mais eficiente e seguro do ambiente, resultando em maior qualidade, maior rendimento das culturas e uso racional dos recursos.

3. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho apresenta os métodos e procedimentos utilizados para o desenvolvimento do projeto, descrevendo as etapas realizadas durante a pesquisa e execução do TCC. Para isso, foram utilizadas pesquisas bibliográficas e coleta de dados por meio de pesquisa de campo, com o objetivo de obter informações relevantes sobre o tema estudado. Além disso, foram realizadas análises e levantamentos necessários para auxiliar no desenvolvimento da proposta apresentada, buscando garantir organização, embasamento teórico e aplicação prática ao longo do trabalho.

3.1 Definições

O trabalho configura-se como um projeto tecnológico, desenvolvido como parte dos requisitos para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial. O estudo tem como objetivo o desenvolvimento de um protótipo de controlador de temperatura e umidade aplicável a estufas utilizadas em sistemas de agricultura de precisão.

A metodologia adotada caracteriza-se como aplicada, uma vez que busca gerar conhecimento voltado à resolução de um problema prático e concreto: o controle automatizado de variáveis ambientais em ambientes de cultivo. De acordo com Gil (2019), a pesquisa aplicada é voltada à produção de conhecimento com fins utilitários e à implementação de soluções práticas para problemas específicos, característica que se alinha diretamente aos objetivos deste projeto.

Além da pesquisa aplicada, o trabalho também incorpora uma revisão de literatura, responsável por fornecer o embasamento teórico e técnico necessário, e uma pesquisa de campo, conduzida com o intuito de validar a viabilidade técnica e econômica da solução proposta junto ao público-alvo. A revisão bibliográfica possibilita a análise de conceitos relacionados à agricultura de precisão, automação de estufas, cultivo de cannabis medicinal e controle baseado em VPD, permitindo identificar as tecnologias e metodologias mais adequadas para o desenvolvimento do projeto. Já a pesquisa de campo contribui para a compreensão das necessidades e dificuldades enfrentadas pelos potenciais usuários da solução, fornecendo subsídios para adequar o sistema às demandas reais de aplicação. Segundo Marconi e Lakatos (2021), a combinação entre investigação

teórica e pesquisa empírica é fundamental para garantir a consistência e a aplicabilidade dos resultados obtidos.

3.1.1 Natureza do Projeto

A natureza do projeto está centrada na Pesquisa Aplicada, com ênfase no Desenvolvimento Tecnológico. Essa abordagem tem como propósito a concepção de uma solução funcional, acessível e eficiente, capaz de atender às demandas da agricultura moderna. O desenvolvimento do controlador envolveu a integração de componentes eletrônicos, como sensores, relés, exaustor e o microcontrolador ESP32, que constitui o núcleo do sistema. Programado na IDE Arduino, o ESP32 realiza a leitura dos sensores, o processamento dos dados ambientais, possibilitando o monitoramento em tempo real e o controle automatizado das variáveis de temperatura e umidade. A fase de testes teve como foco validar o desempenho do sistema desenvolvido, analisando sua capacidade de manter as condições ambientais dentro da faixa ideal de VPD. Essa etapa possibilitou avaliar a precisão das medições, a estabilidade do controle e a eficiência operacional do protótipo, comprovando a aplicabilidade da solução no contexto da agricultura de precisão.

A revisão de literatura, apresentada no capítulo 2, ofereceu o embasamento científico necessário para o desenvolvimento do sistema, permitindo identificar as variáveis críticas do cultivo e as tecnologias mais adequadas para o controle ambiental em estufas. Essa etapa metodológica, segundo Marconi e Lakatos (2021), consiste em reunir, analisar e interpretar publicações relevantes sobre o tema, proporcionando uma compreensão aprofundada que fundamenta o desenvolvimento prático da pesquisa.

Com base nessa revisão, foi possível definir os parâmetros críticos para o cultivo, com destaque para a temperatura e para a umidade relativa do ar, ambas diretamente relacionadas ao VPD. O controle preciso dessas variáveis é essencial para a estabilidade fisiológica das plantas e para o aumento da produtividade.

A revisão também subsidiou a seleção dos componentes de hardware e software. O sensor SHT31 foi escolhido por sua alta precisão e baixo tempo de resposta, enquanto o microcontrolador ESP32 destacou-se por seu baixo consumo energético, garantindo confiabilidade e eficiência ao sistema proposto. Essa base teórica consolidou as decisões técnicas e garantiu coerência entre o embasamento científico e o desenvolvimento prático.

3.2 Pesquisa de Validação

Como etapa complementar da pesquisa aplicada, foi realizada uma pesquisa de campo caráter exploratório e descritivo no evento de cultivadores *Expo Head Grow*, com o objetivo de coletar informações reais que subsidiassem o desenvolvimento e a validação do sistema proposto. Conforme Gil (2019), a pesquisa exploratória tem como finalidade proporcionar maior familiaridade com o problema e aprimorar ideias, enquanto a pesquisa descritiva busca observar e registrar os fenômenos de forma sistemática, sem interferência do pesquisador.

Nesse contexto, a pesquisa de campo teve como propósito compreender os desafios enfrentados por produtores e cultivadores no controle de temperatura e umidade, além de avaliar a aceitação e a viabilidade de soluções automatizadas. De acordo com Marconi e Lakatos (2021), esse tipo de investigação caracteriza-se pela observação direta dos fenômenos no ambiente onde ocorrem, permitindo a obtenção de dados empíricos que complementam a análise teórica.

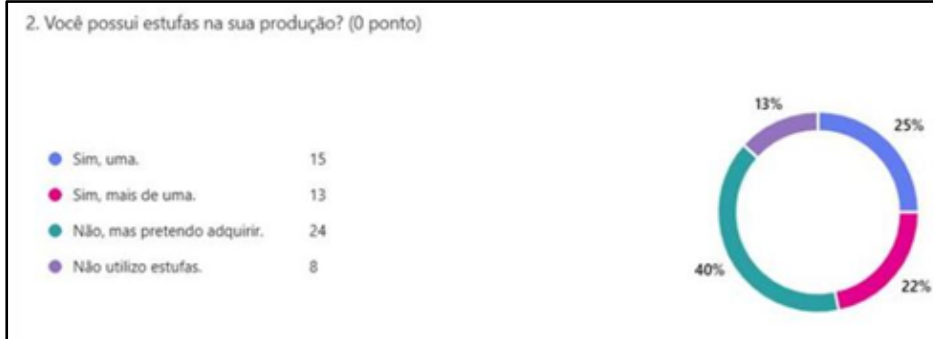
Os resultados da pesquisa indicaram que 45% dos entrevistados ainda não cultivam, mas demonstraram interesse em iniciar um cultivo próprio, o que aponta para um mercado potencial em expansão conforme o gráfico da figura 5.

Figura 4 - Gráfico do porte da produção agrícola



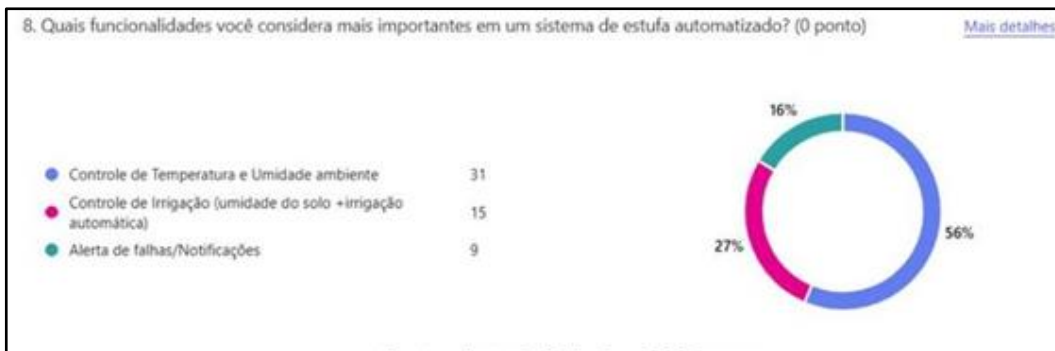
Fonte: Autoria Própria (2025)

Além disso, 40% dos participantes afirmaram que pretendem adquirir uma estufa automatizada, reforçando o crescimento da demanda por soluções acessíveis e inteligentes, conforme visto no gráfico da figura 6.

Figura 5 - Gráfico da presença de estufas no cultivo

Fonte: Autoria Própria (2025)

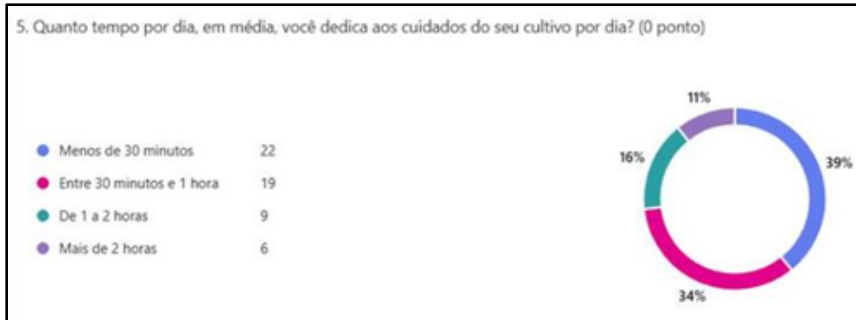
Quando questionados sobre os maiores desafios enfrentados, 56% dos respondentes apontaram o controle de umidade como o fator mais crítico, seguido pela necessidade de melhorar o controle de temperatura, dado apresentado pela figura 8.

Figura 6 - Gráfico das funcionalidades mais importantes

Fonte: Autoria Própria (2025)

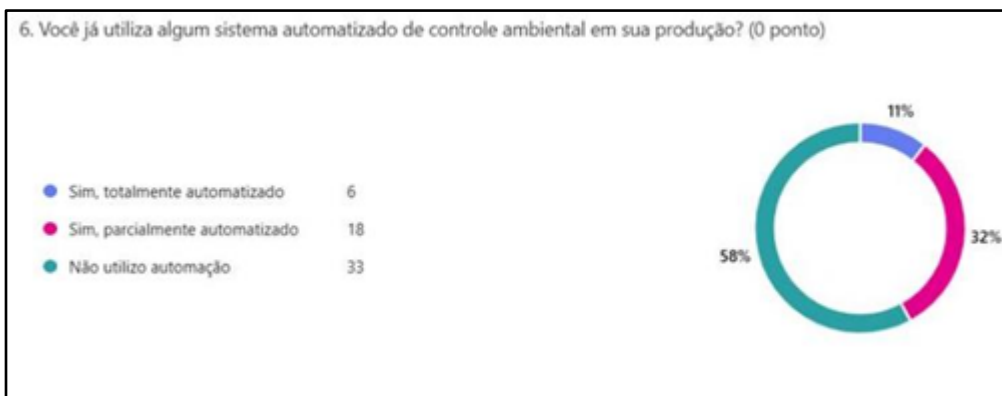
Esses resultados reforçam a pertinência do desenvolvimento de um controlador automatizado capaz de monitorar e ajustar essas variáveis ambientais com precisão, contribuindo diretamente para melhores condições de cultivo e mais eficiência na produção.

A pesquisa revelou que 34% dos entrevistados dedicam de 30 minutos a 1 hora por dia às atividades de cultivo, o que demonstra interesse ativo, mas limitação de tempo para manejos manuais constantes, conforme dados apresentados pela figura 8.

Figura 7 - Gráfico do tempo dedicado ao cultivo

Fonte: Aatoria Própria (2025)

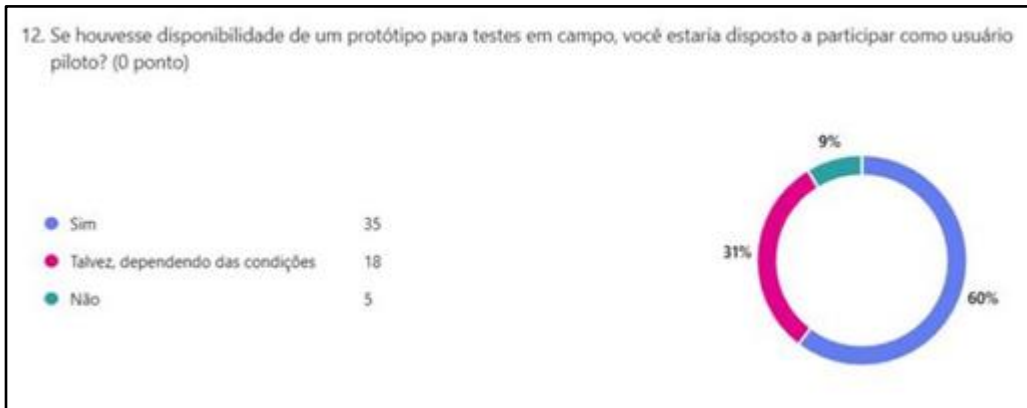
Paralelamente, 58% afirmaram não utilizar nenhum tipo de automação, o que indica amplo espaço para inserção de tecnologias automatizadas que simplifiquem o processo produtivo e aumentem a eficiência, conforme dados apresentados pela figura 9.

Figura 8 - Gráfico do índice de uso de sistemas automatizados nos cultivos

Fonte: Aatoria Própria (2025)

A pesquisa ainda mostrou que 60% dos entrevistados afirmaram que estariam dispostos a participar como “pilotos” em um projeto de automatização de estufas, evidenciando abertura à inovação e disposição em testar novas tecnologias, conforme dados apresentados na figura 10.

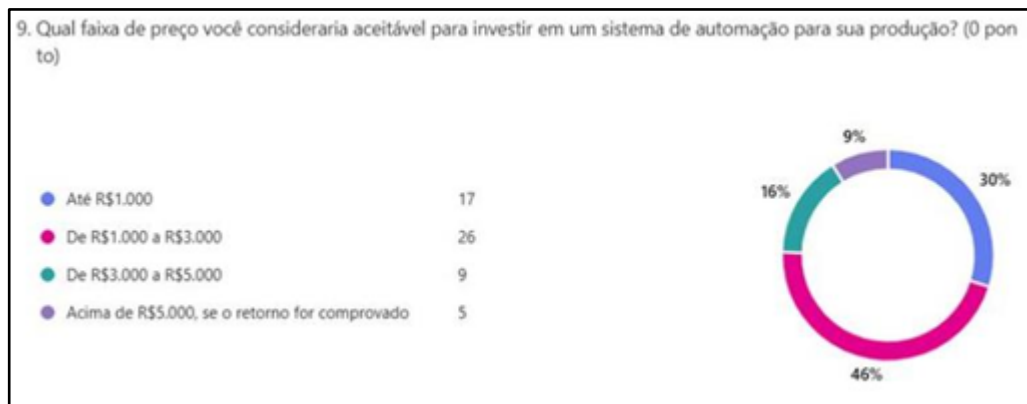
Figura 9 - Gráfico do nível de interesse em ser usuário piloto



Fonte: Autoria Própria (2025)

Com relação ao investimento, 46% dos respondentes indicaram estar dispostos a investir entre R\$ 1.000,00 e R\$ 3.000,00 em um sistema de automação completo para sua estufa, conforme dados apresentados na figura 11.

Figura 10 - Gráfico da faixa de preço estimada pelos entrevistados



Fonte: Autoria Própria (2025)

Os resultados da pesquisa de campo reforçam que existe um público-alvo real, interessado e receptivo à automação de estufas, especialmente quando a solução é acessível e prática.

A predominância de respostas positivas quanto à importância do controle de umidade, desejo de automação e aceitação tecnológica valida a relevância e aplicabilidade do controlador desenvolvido, posicionando o projeto como uma alternativa, sustentável e inovadora dentro do contexto da agricultura de precisão.

Esses dados ofereceram subsídios concretos para o aperfeiçoamento do projeto, possibilitando ajustar as especificações do protótipo às necessidades reais do público-alvo. Assim, a pesquisa de campo consolidou-se como elo fundamental entre a fundamentação teórica, o desenvolvimento tecnológico e a aplicação prática do sistema, confirmando sua viabilidade técnica, funcional e econômica.

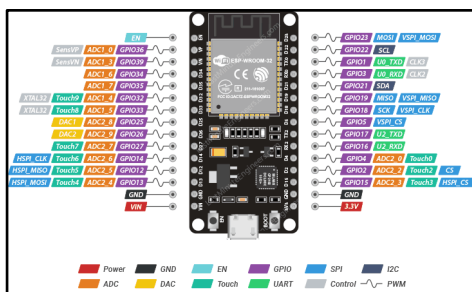
3.3 Materiais

Para o desenvolvimento do controlador de umidade e temperatura, foram empregados materiais com base em componentes previamente estudados na revisão de literatura, e recursos tecnológicos que asseguram a precisão das medições, o processamento confiável dos dados e o acionamento eficiente dos atuadores. A seleção dos componentes considerou critérios como desempenho técnico, compatibilidade entre dispositivos e viabilidade econômica.

3.3.1 Hardware

A unidade de controle do sistema será composta pelo microcontrolador ESP32 DevKit C, conforme a figura 12, desenvolvido pela Espressif Systems, escolhido por sua alta capacidade de processamento e baixo consumo de energia. O dispositivo dispõe de 34 pinos GPIO, dos quais 18 funcionam como conversores *Analog-to-Digital Converter* (ADC) e 2 como conversores *Digital-to-Analog Converter* (DAC), possibilitando ampla interface com sensores e atuadores. Essa versatilidade, somada à excelente relação custo-benefício e à compatibilidade com o ambiente Arduino IDE, simplifica o processo de desenvolvimento e calibração do sistema (LEIBSON, 2022).

Figura 11 - ESP32 Montado em placa de testes

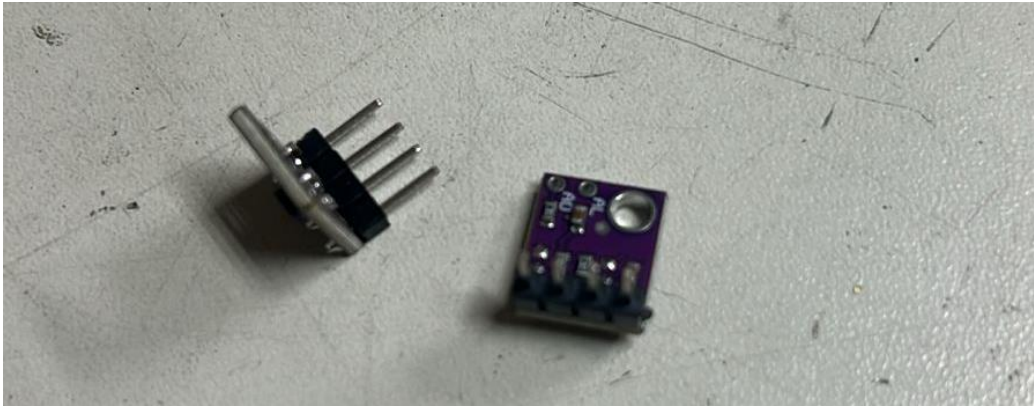


Fonte: ESPRESSIF, 2025

O sensor SHT31, que pode ser observado na figura 13, desenvolvido pela Sensirion, é um dispositivo digital para medição de temperatura e umidade relativa, com faixa de operação de 0 a 100% UR e -40 °C a 125 °C. Apresenta alta precisão, com erro típico de $\pm 2\%$ UR para umidade e $\pm 0,3$ °C para temperatura, sendo adequado para aplicações que exigem confiabilidade nas medições ambientais. (SENSIRION, 2016).

O sensor opera com tensão de alimentação entre 2,15 V e 5,5 V e utiliza comunicação digital via protocolo *Inter-Integrated Circuit* I²C, permitindo fácil integração com microcontroladores. Possui baixo consumo de energia, tempo de resposta em torno de 8 segundos para umidade ($\tau_{63\%}$) e já é calibrado de fábrica, garantindo estabilidade e repetibilidade nas medições ao longo do tempo (SENSIRION, 2016).

Figura 12 - Sensor SHT31



Fonte: Autoria própria (2026)

O sistema também conta com um sensor LDR, responsável pela detecção da intensidade luminosa no ambiente. A utilização desse sensor será importante para monitorar as condições de luminosidade da estufa. A escolha do LDR, apresentado na figura 14 se justifica por sua simplicidade de integração com o ESP32 e valores acessível (OLIVEIRA, 2024).

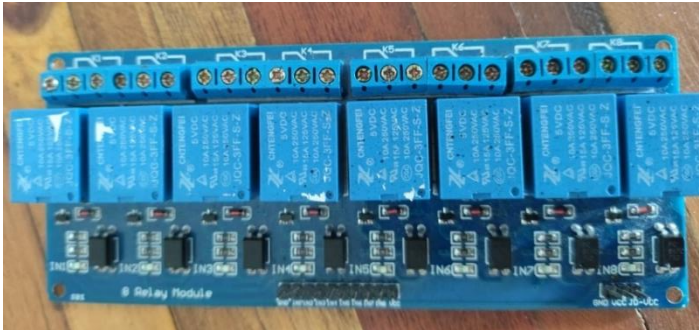
Figura 13 - Sensor LDR



Fonte: Autoria própria (2026)

O acionamento dos dispositivos será realizado por meio do módulo relé JQC-3FF-S-Z de 8 canais, apresentado na figura 15, opera com tensão de alimentação de 3,3 V em corrente contínua. Cada canal suporta correntes de até 10 A e aciona cargas de até 250 V em corrente alternada. (MAKERHERO, 2026).

Figura 14 - Módulo de relé 3V3



Fonte: Autoria própria (2026)

O desumidificador modelo D6, foi selecionado pois apresenta capacidade de desumidificação adequada para ambientes de até 15 m², além de possuir dimensões compactas que facilitam sua integração ao sistema proposto, conforme figura 16. Adicionalmente, seu custo está compatível com os valores praticados no mercado.

Figura 15 - Desumidificador D6



Fonte: Autoria própria (2026)

O microventilador modelo 120×120×38mm da marca GC, apresentado na figura 17, é um dispositivo de ventilação do tipo axial, projetado para aplicações de refrigeração e circulação de ar em sistemas elétricos e eletrônicos. Opera em tensão bivolt (110–220 V AC), com corrente aproximada de 0,24 A e potência em torno de 25 W. Apresenta velocidade de rotação de cerca de 3000 Rotações por minuto (RPM), sendo capaz de promover fluxo de ar adequado para exaustão ou ventilação de ambientes e equipamentos.

Figura 16 - Microventilador 120X120X38 GC



Fonte: Autoria própria (2026)

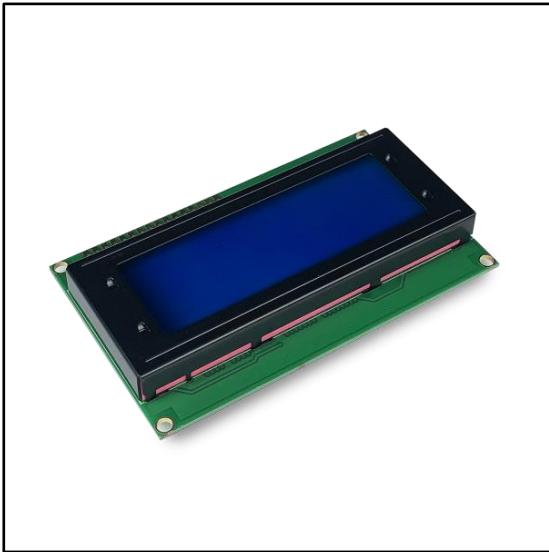
Os componentes serão instalados no interior de um compartimento cúbico confeccionado em *Medium Density Fiberboard* (MDF), com dimensões de 1,70 × 0,60 × 0,70 m, o qual constituirá a estrutura da estufa. Nesse ambiente controlado, será implementado o sistema de monitoramento e controle de temperatura, permitindo a avaliação e o ajuste das condições térmicas conforme os parâmetros definidos no projeto.

Para a montagem e testes, serão utilizados protoboard e jumpers para conexões temporárias, fontes de alimentação de 5V e 12V compatíveis com os módulos, além de ferramentas de bancada, como multímetro, cabos e conectores, para medições e validações iniciais.

O desenvolvimento e a programação do sistema serão realizados em dois equipamentos de apoio, um notebook com sistema operacional Windows 10, equipado com 16 GB de memória RAM, e um computador com sistema operacional Windows 11, processador AMD Ryzen 5 5600 e 16 GB de memória RAM. Essas configurações garantirão desempenho adequado para as atividades de codificação, simulação e monitoramento serial.

Para a interface de visualização das informações do sistema, foi utilizado um display LCD 20x4 com comunicação I²C e alimentação de 5 V, apresentado na figura 18, permitindo a exibição dos parâmetros monitorados e das informações de operação de forma prática e eficiente.

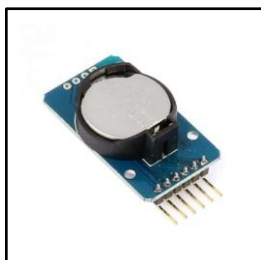
Figura 17 - Display LCD 20X4



Fonte: MAKERHERO (2025)

Para fornecer referência de tempo ao sistema, foi utilizado o módulo *Real Time Clock* (RTC) DS3231, conforme a figura 19, responsável por manter a contagem precisa de data e hora mesmo na ausência de alimentação principal, graças à sua bateria de backup integrada. A utilização desse componente permitiu registrar eventos em tempo real e possibilitou a implementação de funções dependentes de horário, como o controle dos ciclos de iluminação da estufa. Além disso, o módulo se comunica com o microcontrolador por meio do protocolo I²C, proporcionando fácil integração ao sistema e elevada precisão na manutenção das informações.

Figura 18 - Modulo RTC DS3231



Fonte: MAKERHERO (2026).

3.3.2 Software

O desenvolvimento lógico do sistema será realizado por meio de ferramentas de softwares livres e multiplataforma, amplamente utilizadas em projetos de automação, garantindo flexibilidade, custo-benefício e compatibilidade com os dispositivos selecionados.

A IDE Arduino versão 2.3.6, será empregada como ambiente de desenvolvimento principal, utilizada para a programação do microcontrolador ESP32, compilação do código-fonte e upload do firmware para a placa. Essa plataforma foi escolhida por sua interface intuitiva, ampla base de bibliotecas disponíveis e compatibilidade direta com o ESP32, o que facilitará o processo de escrita, teste e depuração do programa de controle.

3.3.3 Tabela de materiais

Na Tabela 1, a seguir, estão apresentados de forma organizada todos os materiais e recursos físicos e computacionais que serão utilizados no desenvolvimento do controlador de temperatura e umidade. Esses elementos incluem componentes eletrônicos, sensores, atuadores e ferramentas de software necessárias para a implementação do sistema. A organização dessas informações permite uma melhor visualização dos recursos empregados, facilitando o planejamento, a montagem e a análise do projeto.

Tabela 1 - Materiais e Recursos

Componente / Recurso	Modelo / Descrição	Função principal	Características relevantes
Sensor de temperatura e umidade	SHT31	Medição precisa da temperatura e umidade do ambiente	Alta precisão, comunicação I ² C,
Sensor de luminosidade (LDR)	LDR	Monitorar a intensidade luminosa	Variação resistiva conforme a luz incidente, baixo custo e fácil integração
Microcontrolador	ESP32	Processamento de dados e controle dos atuadores	Baixo consumo, versatilidade, 34 GPIOs (18 ADC e 2 DAC)

Componente / Recurso	Modelo / Descrição	Função principal	Características relevantes
Microventilador	GC 120X120X38	Circulação e resfriamento do ar	3000 RPM, 120×120×38 mm, bivolt (127/220 V)
Desumidificador	D6	Reduzir umidade quando acima do limite	Baixo consumo, desligamento automático, operação silenciosa
Módulo de relé	JQC-3FF-S-Z	Comutação elétrica entre controle e potência	Isolamento elétrico, acionamento de cargas AC/DC
Protoboard e jumpers	—	Montagem e teste do circuito	Facilita conexões e modificações no protótipo
Notebook	Windows 10 / 8 GB RAM	Programação e simulação	Execução da IDE Arduino
Computador de bancada	Windows 11 / Ryzen 5 5600 / 16 GB RAM	Desenvolvimento e integração do sistema	Capacidade para simulação, monitoramento
Arduino IDE	v 2.3.6	Programação do ESP32	Suporte à linguagem C/C++, compatível com bibliotecas
Estrutura	—	Ambiente de controle de microclima e fixação dos componentes	Compartimento 1,70x0,60x0,70
Cabo Shield	YSLCY-JZ 4x1 300/500 V FABER 20101 2022	Comunicação entre componentes	Proteção contra ruídos
Display LDC 20x4	-	Interface de visualização	Comunicação I ² C
Módulo RTC DS3231	-	Referência de tempo real	Comunicação I ² C
Disjuntor 20 ^a	-	Proteção do circuito	-

Fonte: Desenvolvido pelos autores, 2026.

3.4 Procedimentos do projeto

A metodologia utilizada no projeto foi estruturada em etapas sequenciais, permitindo o avanço sistemático do projeto desde a concepção até a validação dos resultados.

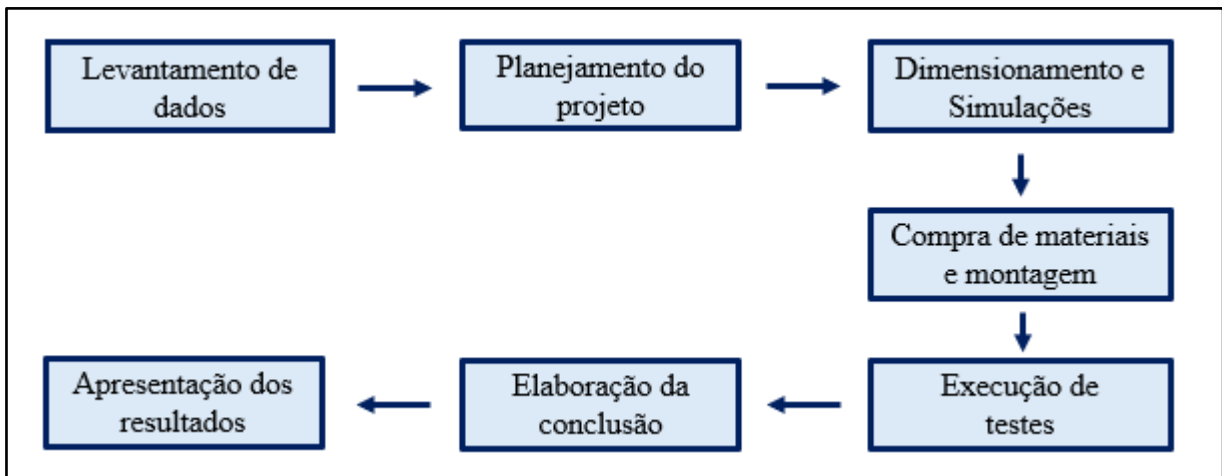
O processo iniciou-se com o levantamento de dados, etapa fundamental para compreender os parâmetros ideais de cultivo da cannabis medicinal, as faixas ideais de VPD para cada estágio de crescimento da planta e as tecnologias de controle ambiental disponíveis no mercado, além do interesse do público pelo produto desenvolvido. Com base nessas informações, foram definidos os

requisitos funcionais do sistema, a arquitetura do controlador e os componentes necessários para sua implementação.

Em seguida, iniciou-se a etapa de dimensionamento e simulações, que permitiu validar teoricamente o projeto, verificando a capacidade dos sensores, atuadores e do algoritmo de controle em manter as condições ambientais dentro das faixas desejadas de VPD. Após essa validação, realizou-se a compra de materiais e montagem do protótipo, que com auxílio de ferramentas como multímetro, furadeira, chaves de fenda, alicate de corte, ferro de solda, foram integrados componentes eletrônicos, sensores de temperatura e umidade, e os sistemas de atuação.

Com o protótipo montado, foi possível avaliar o desempenho do controlador em condições reais de operação, coletando dados para análise de estabilidade, tempo de resposta e precisão do sistema. Os dados obtidos subsidiaram a elaboração da conclusão, permitindo identificar pontos de melhoria e validar a eficácia do controlador. Por fim, a apresentação dos resultados consolida os achados do projeto, demonstrando a viabilidade técnica da solução proposta. Essa estrutura pode ser observada na figura 19 a seguir.

Figura 19 - Fluxograma de etapas de desenvolvimento do projeto



Fonte: Autoria própria (2026)

4. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo será explicado o como foi realizado desenvolvimento do protótipo do controlador de VPD e construção da estufa. Esta etapa possui o objetivo de apresentar a arquitetura do sistema, a estrutura física da estufa, hardware, programação, integração dos módulos, testes e validação do sistema.

4.1 Arquitetura geral do sistema

O sistema de controle desenvolvido utiliza o microcontrolador ESP32 como unidade mestre responsável pelo processamento das informações obtidas pelos sensores instalados na estufa. A partir da leitura dos parâmetros de temperatura e umidade, o controlador determina o estado ambiental da estufa.

Os parâmetros utilizados para essa classificação variam de acordo com o estágio de desenvolvimento da planta, e com base neles, o sistema realiza a tomada de decisão para o acionamento dos atuadores responsáveis pelo controle climático da estufa.

Além disso, as informações referentes à temperatura, umidade, estado atual do ambiente e fase de desenvolvimento da planta são exibidas em um display integrado ao sistema, permitindo o monitoramento em tempo real das condições internas da estufa.

4.2 Estrutura funcional do sistema

O ESP32 utiliza entradas *Serial Data* (SDA) e *Serial Clock* (SCL) para receber os dados do SHT31, por meio do protocolo de comunicação I²C enquanto os sinais do desumidificador e LDR são recebidas entradas digitais. A tomada de decisão será baseada em dois critérios, primeiro o estado de desenvolvimento da planta que será dividido entre vegetativo (VEG), floração (FLOR) e final (FIN). Cada um desses estados possui parâmetros específicos para determinar se o ambiente está úmido, seco ou ideal, de acordo com a tabela de VPD.

Para definir o valor do VPD, o sistema utiliza a equação de Tetens que, com base nos dados de temperatura e umidade, calcula a pressão de vapor de saturação (SVP). Esse parâmetro é

fundamental para a determinação do VPD, permitindo uma avaliação mais precisa das condições ambientais e contribuindo para a otimização do desenvolvimento da cultura. A equação 1 apresenta o cálculo utilizado para a obtenção da SVP.

Equação 1 – Cálculo de SVP

$$SVP = 0,6108 \times 10^{\frac{7,5 \times T}{237,3 + T}}$$

Fonte: Universidade de São Paulo, 2026

A partir do resultado dessa equação se realiza o cálculo de pressão de vapor real (AVP), conforme a equação 2.

Equação 2 – Cálculo de AVP

$$AVP = SVP \times \frac{UR}{100}$$

Fonte: Universidade de São Paulo, 2026

Por fim, com esses dois valores, encontra-se o VPD, conforme a equação 3.

Equação 3 – Cálculo de VPD

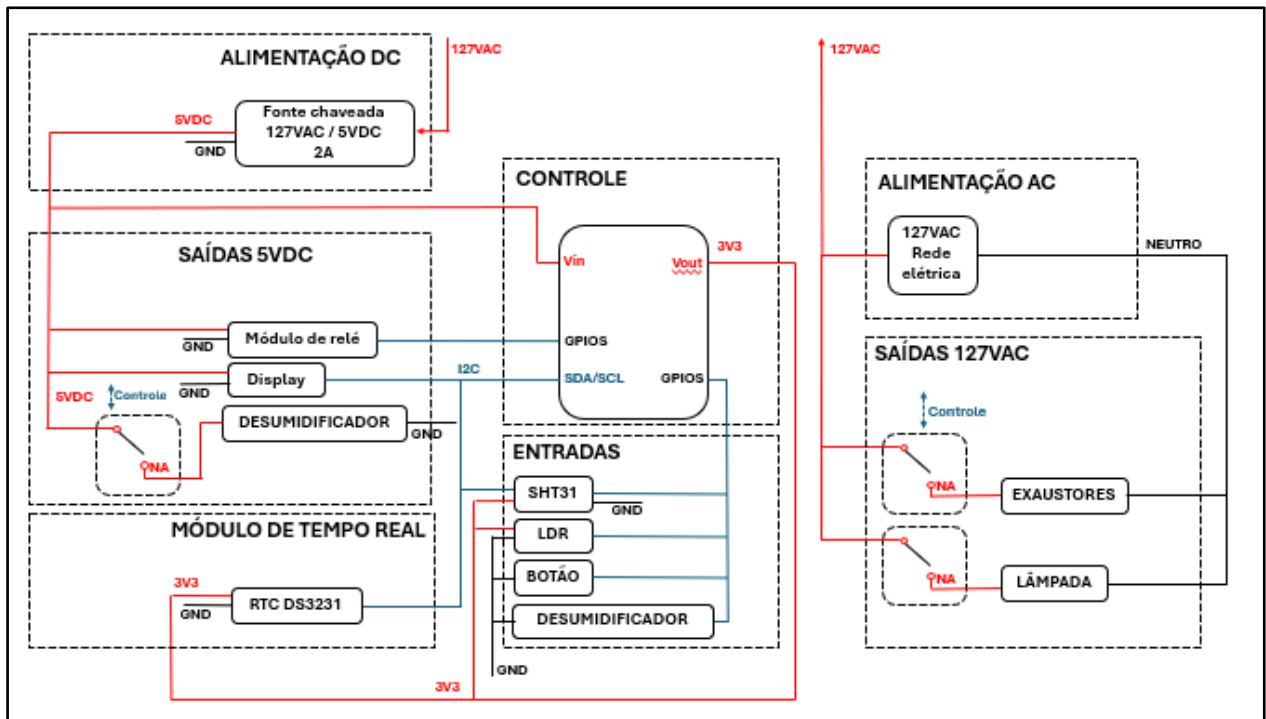
$$VPD = SVP - AVP$$

Fonte: Universidade de São Paulo, 2026

Se o ambiente estiver úmido, ele analisa se o motivo é umidade alta ou temperatura baixa e com base nisso, determina quais atuadores entrarão em ação, caso o ambiente esteja seco, o sistema analisa se essa condição foi causada por alta temperatura ou umidade baixa e com base nisso realiza a tomada de decisão. No estado de VPD ideal, durante o estado vegetativo, um exaustor ficará ligado constantemente, e o desumidificador ficará desligado, já na flora e estado final 2 exaustores ficarão ligados e o desumidificador desligado.

A estrutura do sistema pode ser observada no diagrama de blocos apresentado na figura 21.

Figura 20 - Diagrama de blocos



Fonte: Autoria própria (2026).

4.3 Arquitetura Mestre-Escravo

A arquitetura adotada para o sistema foi a do tipo mestre-escravo, devido à sua elevada capacidade de escalabilidade horizontal, permitindo a integração de novos módulos e dispositivos ao sistema de forma simplificada em futuras expansões. Além disso, essa arquitetura possibilita a realização de manutenções individuais nos dispositivos escravos sem a necessidade de interromper completamente o funcionamento do sistema, aumentando sua modularidade e confiabilidade operacional.

A utilização da arquitetura mestre-escravo também proporciona maior organização no gerenciamento das informações trafegadas no sistema, reduzindo a ocorrência de inconsistências e conflitos de comunicação entre os dispositivos conectados. Nesse contexto, o ESP32 atua como dispositivo mestre, sendo responsável pela aquisição dos dados provenientes dos sensores, processamento e interpretação das informações coletadas, definição do estado operacional do

sistema, exibição dos parâmetros no display e execução da lógica de controle para acionamento dos atuadores.

A escolha dessa arquitetura se justifica pela necessidade de centralização do processamento e da tomada de decisão em um único dispositivo controlador, simplificando a implementação do sistema e facilitando futuras manutenções e expansões.

O protocolo de comunicação empregado entre o SHT31, o display e o módulo de relógio de tempo real DS3231 foi o I²C. A escolha desse protocolo ocorreu devido à sua simplicidade de implementação, baixa complexidade de hardware e reduzida quantidade de conexões necessárias, utilizando apenas duas linhas de comunicação: SDA e SCL.

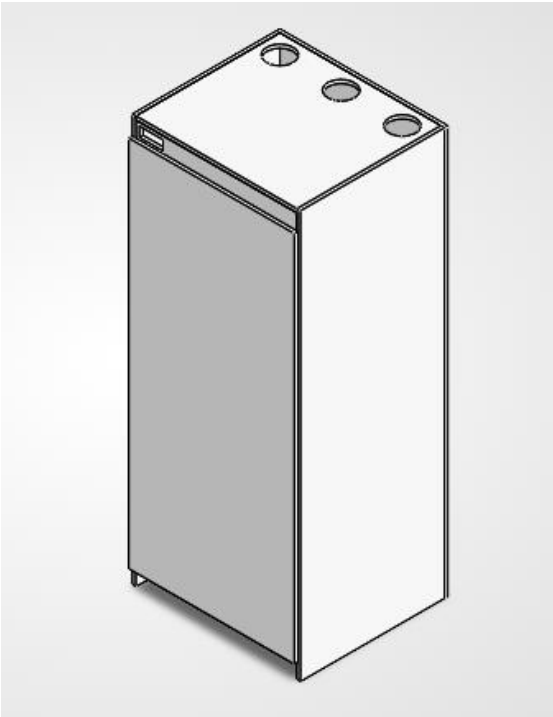
Para a comunicação entre os dispositivos conectados ao barramento I²C, foi definida uma frequência de atualização do sistema de aproximadamente 2Hz, garantindo uma taxa adequada de aquisição e processamento dos dados para o correto funcionamento do sistema de controle.

4.4 Projeto estrutural da estufa

A estrutura da estufa foi construída utilizando placas de MDF com espessura de 15 mm. A escolha desse material deve-se às suas propriedades de isolamento térmico, uma vez que o MDF apresenta baixa condutividade térmica, reduzindo a taxa de transferência de calor entre o ambiente interno e o ambiente externo. Como resultado, as variações de temperatura no interior da estufa ocorrem de forma mais gradual, contribuindo para uma maior estabilidade térmica e para a redução das perdas de calor para o meio externo.

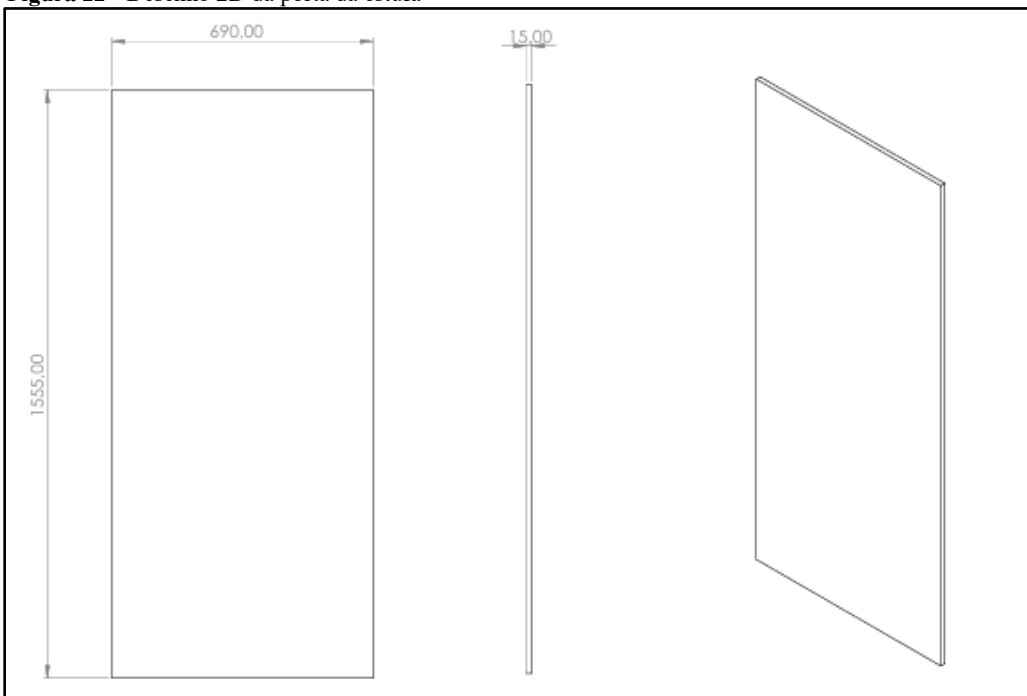
Com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento e na validação do projeto, foi elaborado um modelo tridimensional da estufa, permitindo a visualização prévia da estrutura e de seus componentes antes da construção física. O modelo desenvolvido é apresentado nas figuras 22, 23 e 24.

Figura 21 - Modelo 3D da estufa



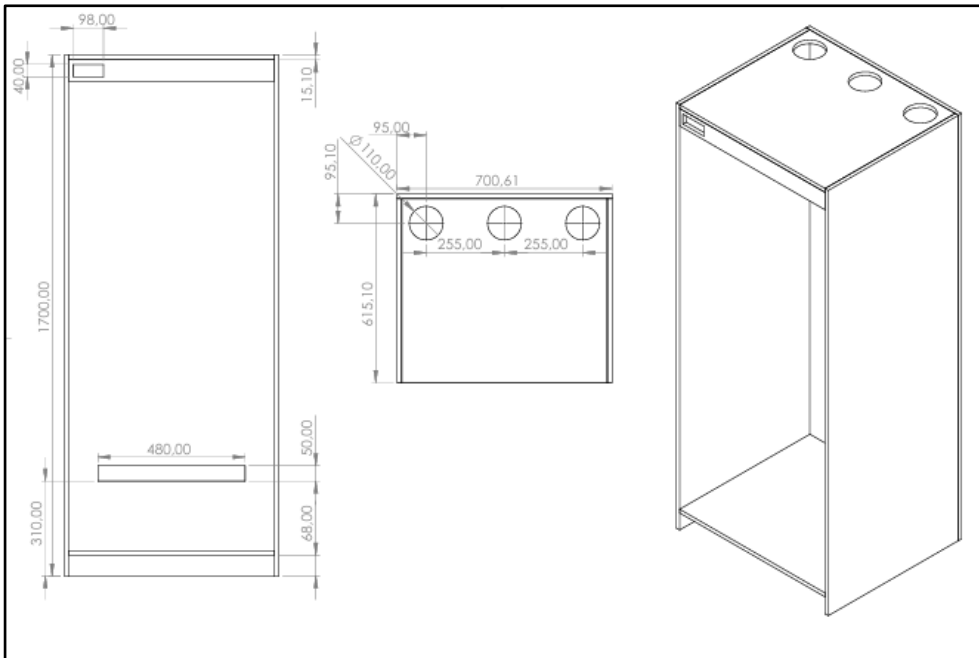
Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 22 - Desenho 2D da porta da estufa



Fonte: Autoria própria (2026)

Figura 23 - Desenho 2D da estufa



Fonte: Autoria própria (2026)

Dessa forma, a estufa foi projetada com uma entrada passiva de ar localizada na parte inferior e três saídas circulares de ar posicionadas na parte superior. Nessas saídas foram instalados os exaustores, responsáveis pela remoção do ar quente acumulado no interior do ambiente, promovendo a renovação e a circulação do ar.

O display foi instalado no canto superior esquerdo da face frontal da estufa, visando proporcionar melhor visualização das informações pelos usuários. Já o painel de controle foi fixado em um teto falso, permitindo maior facilidade de acesso para manutenção, organização dos componentes e futuras expansões do sistema por meio da adição de novos módulos.

O desumidificador foi posicionado na parte inferior da estufa, uma vez que, em condições de redução da temperatura, o ar próximo ao solo tende a apresentar temperaturas mais baixas e, conseqüentemente, maior umidade relativa. Dessa forma, sua instalação nessa região permite atuar diretamente sobre a camada de ar com maior concentração de umidade, aumentando a eficiência do processo de desumidificação.

O sensor de temperatura e umidade SHT31 foi instalado aproximadamente na região central da estufa. Essa posição foi escolhida porque o ar próximo ao teto tende a apresentar temperaturas mais elevadas e menor umidade relativa, enquanto o ar próximo ao solo geralmente é mais frio e

úmido. Assim, a instalação do sensor em uma posição intermediária possibilita a obtenção de medições mais representativas das condições médias do ambiente.

O disjuntor e a tomada de 127 VAC destinados à alimentação da lâmpada LED foram instalados no canto superior esquerdo da parte traseira da estufa. O cabo principal de alimentação elétrica foi introduzido por meio de um prensa-cabo localizado no canto inferior esquerdo da estrutura, garantindo maior proteção mecânica, organização da fiação e segurança da instalação elétrica conforme a figura 25.

Figura 24 - Estufa montada

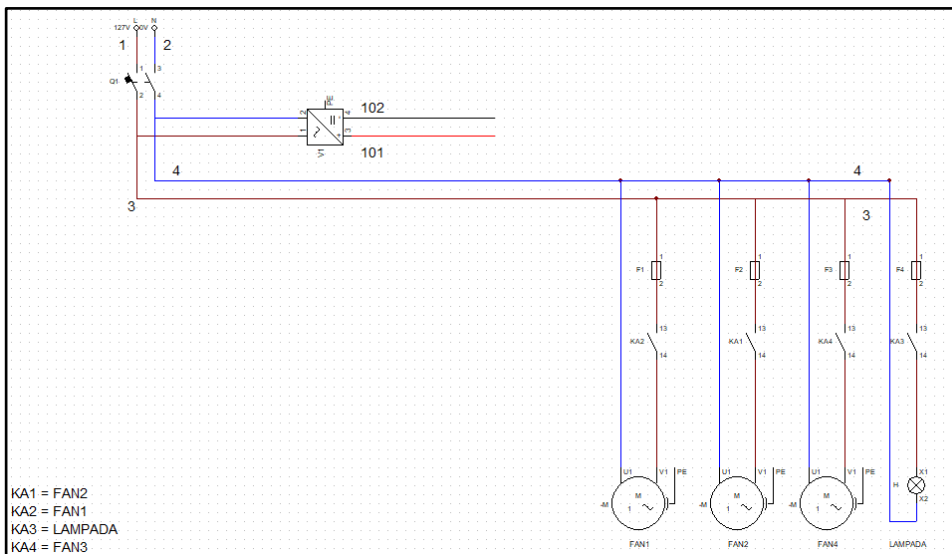


Fonte: Autoria própria (2026)

4.5 Desenvolvimento dos Circuitos

Para montagem projeto, foi desenvolvido um diagrama elétrico que utilizamos como base para o projeto. Na primeira página, apresentada na figura 26 consta a alimentação da fonte e dos atuadores do circuito, protegidos por um disjuntor de 20A que são acionados pelos relés KA1, KA2, KA3 e KA4. Cada um dos atuadores e a fonte são protegidos por fusíveis individuais, para os ventiladores, um fusível de 0,2A de ação lenta (T), já para a lâmpada, um fusível de 20A de ação rápida.

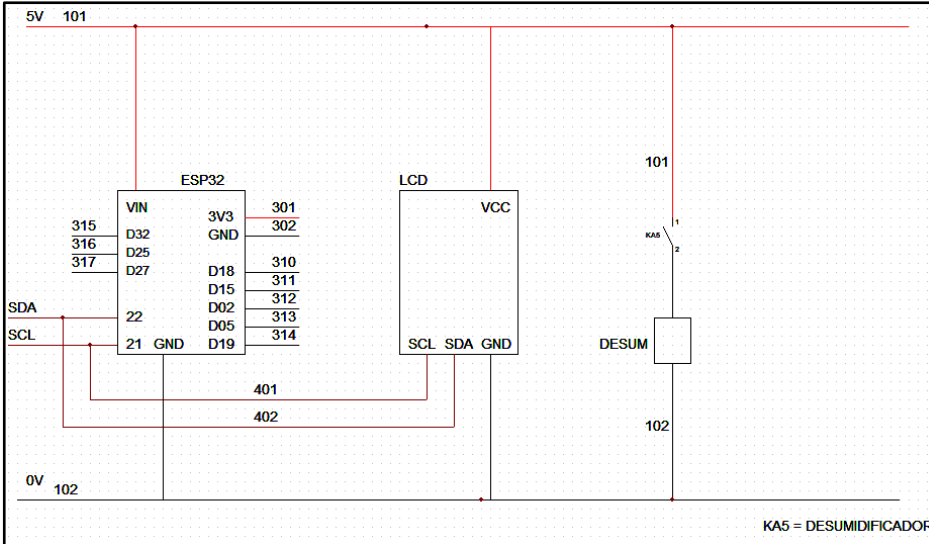
Figura 25 - Página 1 do diagrama elétrico



Fonte: Autoria própria (2026)

Na segunda página do diagrama elétrico encontra-se o circuito de alimentação em 5 Vcc do sistema de comando do projeto, responsável pela alimentação do microcontrolador ESP32, bem como pelo acionamento do desumidificador e do display LCD, conforme a figura 27.

Figura 26 - Página 2 do diagrama elétrico

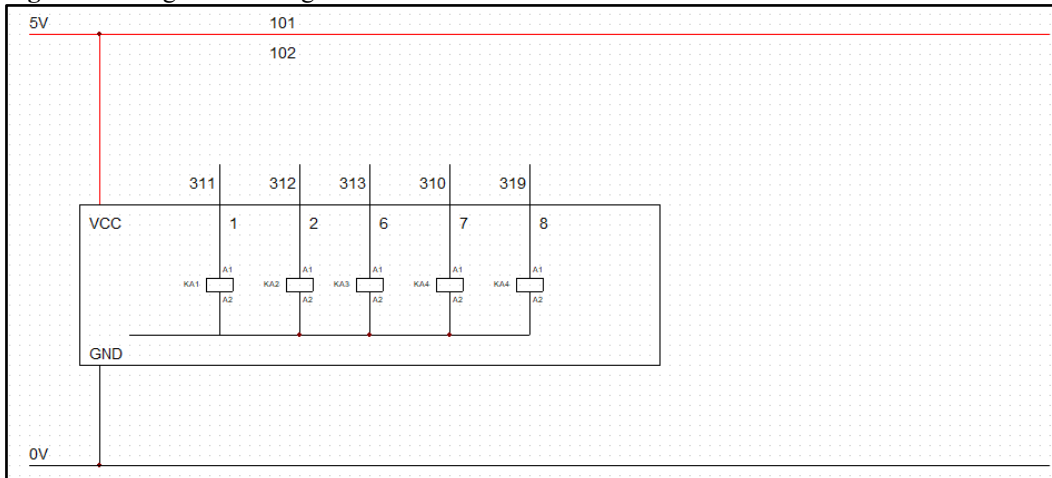


Fonte: Autoria própria (2026)

Além dos circuitos de alimentação, a segunda página do diagrama apresenta a identificação de todas as portas GPIO do ESP32 utilizadas no desenvolvimento do programa, incluindo os pinos destinados à comunicação I²C e os terminais de alimentação de 3,3 V e GND do microcontrolador.

Na página 3 do diagrama constam as ligações do módulo de relés, com a alimentação e as conexões feitas do módulo para o ESP32, conforme a figura 28.

Figura 27 - Página 3 do diagrama elétrico

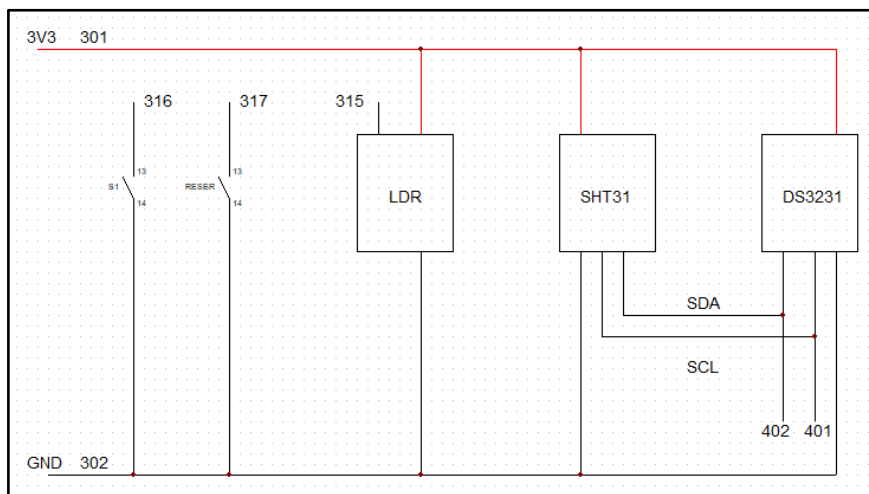


Fonte: Autoria própria (2026)

Na quarta e última página do diagrama elétrico são apresentados os circuitos alimentados pelas saídas de 3,3V e GND do ESP32. Nessa página também estão identificados os sinais de

comunicação I²C utilizados pelos dispositivos SHT31 e DS3231, bem como os sinais provenientes do sensor LDR, do sensor de nível do reservatório e do botão S1, os quais são utilizados para o monitoramento e controle das funções do sistema, conforme a figura 29.

Figura 28 - Página 4 do diagrama elétrico



Fonte: Autoria própria (2026)

4.6 Desenvolvimento do Software Embarcado

O algoritmo inicia com a etapa de configuração dos periféricos, na qual são inicializados o microcontrolador ESP32, o sensor de temperatura e umidade SHT31, o relógio de tempo real (RTC DS3231), o display LCD e os pinos de entrada e saída responsáveis pelo acionamento dos dispositivos do sistema.

Após a inicialização, o programa entra em um laço de execução contínua, realizando periodicamente a leitura do relógio de tempo real e do botão de seleção de fase. O botão permite alternar manualmente entre as fases de cultivo (vegetativa, floração e final), enquanto o RTC é utilizado para realizar a mudança automática de fase com base no número de dias transcorridos desde o início do cultivo.

Em seguida, o sistema verifica o estado do sensor de nível do reservatório do desumidificador e executa o controle do fotoperíodo, acionando ou desligando a iluminação de acordo com a fase de desenvolvimento da planta e com o horário definido. Posteriormente, é realizada a leitura do sensor LDR, cuja função é monitorar a iluminação real da estufa e detectar possíveis falhas entre o comando enviado à lâmpada e a condição efetivamente observada.

Na próxima etapa, são adquiridos os dados de temperatura e umidade relativa do ar por meio do sensor SHT31. As leituras passam por uma rotina de validação que verifica a existência de valores inválidos ou fora dos limites operacionais estabelecidos. Caso seja detectada alguma inconsistência, o sistema ativa uma condição de falha do sensor, acionando os mecanismos de proteção definidos para o sistema.

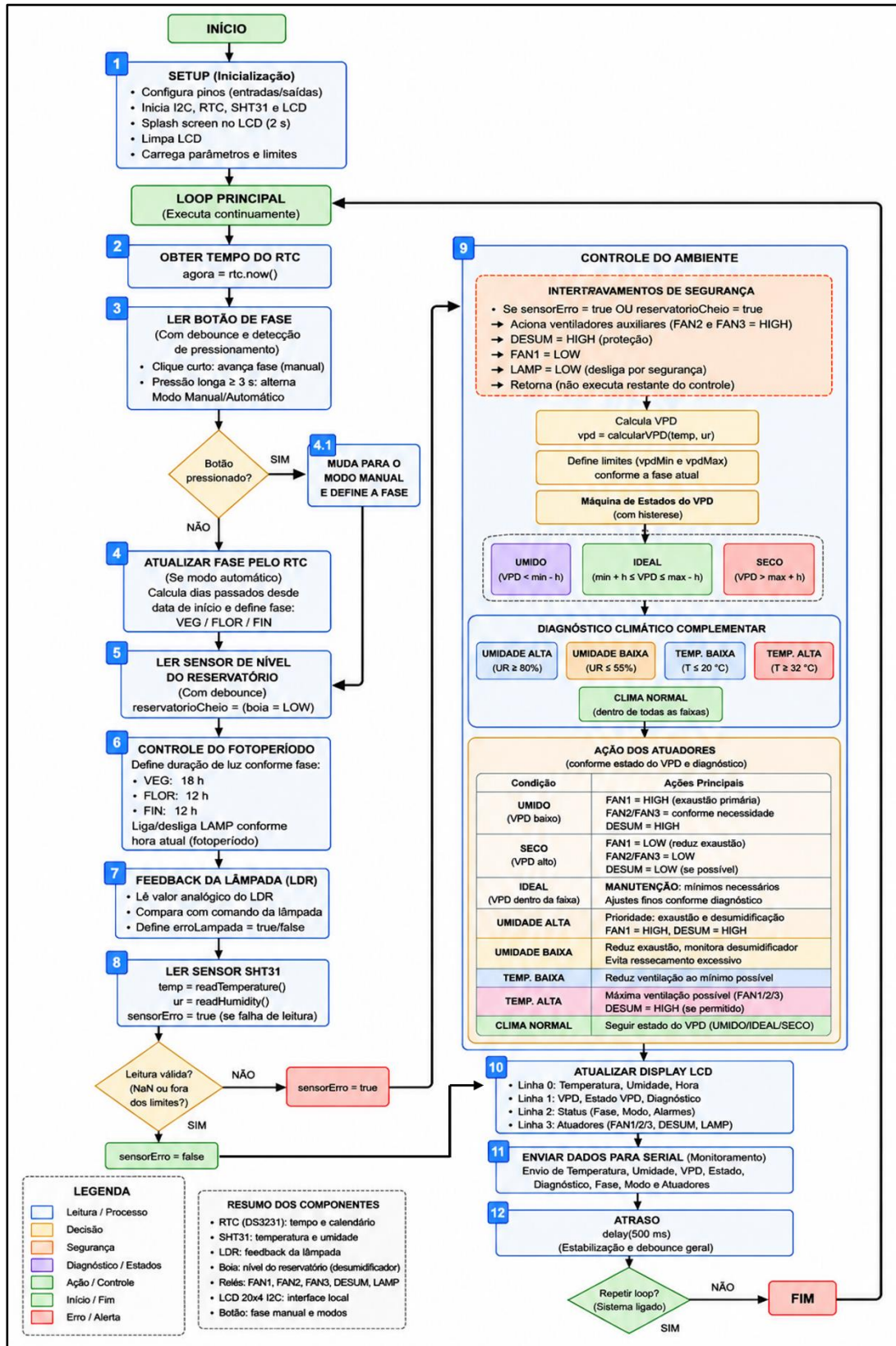
Com os valores de temperatura e umidade considerados válidos, o controlador calcula o VPD utilizando a equação de Tetens. O valor obtido é comparado com as faixas de referência definidas para cada fase de cultivo, permitindo classificar o ambiente como úmido, ideal ou seco. A partir dessa classificação, uma máquina de estados com histerese determina o acionamento dos ventiladores e do desumidificador, evitando comutações excessivas dos atuadores e garantindo maior estabilidade operacional.

Para auxiliar na tomada de decisão de quais atuadores irão atuar, foram incluídos na programação estados auxiliares de temperatura alta, temperatura baixa, umidade alta e umidade baixa, com base em valores retirados da tabela de VPD.

Por fim, os dados de temperatura, umidade, VPD, fase de cultivo e possíveis alarmes são apresentados no display LCD e enviados pela interface serial para fins de monitoramento. Após um intervalo de atualização de 500ms, o ciclo é reiniciado, mantendo o sistema em operação contínua e permitindo o controle automático das condições ambientais da estufa.

A Figura 30 apresenta o fluxograma de funcionamento do sistema de automação e controle de microclima desenvolvido para a estufa.

Figura 29 - Fluxograma do programa



Fonte: Autoria própria (2026)

4.7 Programação do ESP32

O software responsável pelo controle da estufa foi desenvolvido utilizando a linguagem de programação C++, amplamente empregada em sistemas embarcados devido à sua eficiência, portabilidade e compatibilidade com plataformas de microcontroladores. A implementação foi realizada por meio da Arduino IDE, ambiente de desenvolvimento integrado que oferece suporte à programação do ESP32 e facilita a integração com diferentes sensores e dispositivos eletrônicos.

Para viabilizar as funcionalidades do sistema, foram utilizadas bibliotecas específicas para cada periférico empregado no projeto. A biblioteca Wire foi utilizada para estabelecer a comunicação I²C entre o ESP32 e os dispositivos conectados ao barramento. A biblioteca RTCLib foi empregada para o gerenciamento do módulo de relógio de tempo real DS3231, responsável pelo controle do calendário e do fotoperíodo. Para a aquisição dos dados de temperatura e umidade relativa do ar foi utilizada a biblioteca Adafruit_SHT31, enquanto a biblioteca LiquidCrystal_I2C foi utilizada para a comunicação com o display LCD. Adicionalmente, a biblioteca math.h foi empregada para a execução das operações matemáticas necessárias ao cálculo do VPD.

A estrutura do código foi organizada de forma modular, dividida em funções específicas para cada tarefa do sistema. Essa abordagem facilita a manutenção, a identificação de falhas e futuras expansões do projeto. As principais funções implementadas são responsáveis pela leitura do botão de seleção de fase, atualização automática do estágio de cultivo por meio do RTC, controle do fotoperíodo, cálculo do VPD, controle climático da estufa e atualização das informações exibidas no display LCD.

A organização funcional do software permite que cada módulo execute uma tarefa específica de forma independente. A função de leitura do botão realiza o gerenciamento das mudanças de fase e do modo de operação manual ou automático. A função de atualização da fase utiliza a data fornecida pelo RTC para determinar automaticamente o estágio de desenvolvimento da planta. O controle do fotoperíodo gerencia o acionamento da iluminação de acordo com a fase atual do cultivo. Já a função de controle ambiental utiliza os dados do sensor SHT31 para calcular o VPD e definir o acionamento dos ventiladores e do desumidificador.

A comunicação entre os módulos ocorre principalmente por meio do compartilhamento de variáveis globais e da comunicação I²C. O barramento I²C é utilizado para a troca de informações entre o ESP32, o sensor SHT31, o módulo RTC DS3231 e o display LCD, reduzindo a quantidade

de pinos necessários para a interconexão dos dispositivos. As informações coletadas pelos sensores são processadas pelo microcontrolador e distribuídas aos demais módulos de controle e monitoramento do sistema.

O gerenciamento das variáveis foi realizado por meio de variáveis globais, estruturas do tipo enum e variáveis booleanas. As estruturas enumeradas foram utilizadas para representar os estados do ciclo de cultivo (VEG, FLOR e FIN) e os estados ambientais relacionados ao VPD (Úmido, Ideal, Seco, temperatura alta, temperatura baixa, umidade alta, umidade baixa). Variáveis booleanas foram empregadas para indicar condições de operação, falhas de sensores, nível do reservatório, modo manual e detecção de falha da iluminação. Essa estratégia simplifica a implementação da lógica de controle e melhora a legibilidade do código.

A temporização do sistema é realizada por diferentes mecanismos. O módulo RTC fornece informações precisas de data e hora para o gerenciamento das fases de cultivo e do fotoperíodo. O tratamento do acionamento do botão de mudança de fase utiliza a função `millis()` para implementar o *debounce* por software, eliminando oscilações mecânicas dos contatos. O mesmo método é empregado na leitura do sensor de nível do reservatório, garantindo maior confiabilidade nas detecções.

O tratamento de erros foi implementado para aumentar a segurança e a confiabilidade do sistema. As leituras do sensor SHT31 são verificadas quanto à presença de valores inválidos ou fora dos limites operacionais estabelecidos. Caso seja detectada alguma inconsistência, o sistema ativa uma condição de falha do sensor e entra em modo de proteção. Da mesma forma, o monitoramento do reservatório do desumidificador interrompe o funcionamento dos dispositivos quando o nível máximo de água é atingido. O sistema também realiza a supervisão da iluminação por meio de um sensor LDR, comparando o comando enviado à lâmpada com a luminosidade efetivamente detectada, possibilitando a identificação de falhas de acionamento. Todas as condições de erro são informadas ao usuário através do display LCD, permitindo uma rápida identificação e correção de eventuais problemas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentados e analisados os dados obtidos a partir dos testes práticos realizados com o protótipo. Inicialmente, aborda-se o processo de validação do hardware e do firmware desenvolvidos, seguido pela análise do desempenho da lógica de controle em malha fechada para temperatura, umidade e cálculo do VPD. Adicionalmente, discutem-se os resultados referentes à viabilidade econômica e o seu potencial de escalabilidade tecnológica voltada à agricultura de precisão.

5.1 Testes e Validação do Protótipo

Após a montagem física e a integração dos componentes eletrônicos ao microcontrolador ESP32, foram realizados testes em ambiente controlado com o objetivo de validar o funcionamento do hardware e a estabilidade do firmware desenvolvido. O principal critério de avaliação consistiu em verificar a capacidade do sistema em processar as leituras sensoriais localmente e atuar de forma autônoma sobre as variáveis ambientais, buscando manter o VPD dentro das faixas recomendadas para o cultivo. O monitoramento contínuo das variáveis ambientais é fundamental para garantir condições adequadas em sistemas automatizados de cultivo protegido. (OSORES *et al*, 2018)

Os testes foram conduzidos simulando variações térmicas e de umidade no ambiente interno da estufa. O sistema permaneceu em operação contínua por um período de 24 horas, permitindo monitorar o comportamento do algoritmo de controle em malha fechada sob regime permanente. Durante essa etapa, validou-se a robustez do circuito eletrônico, a ausência de travamentos no código processado pelo ESP32 e o acionamento correto dos módulos relés responsáveis pela climatização local. Essa abordagem prática de validação contribuiu para um manejo agrícola mais preciso e eficiente, alinhando o protótipo aos conceitos consolidados de agricultura de precisão (OLIVEIRA, 2024). A disposição final da estrutura física da estufa, bem como o arranjo interno dos componentes eletrônicos e dos *coolers* de exaustão utilizados durante a execução desses ensaios, é apresentada na figura 31.

Figura 30 - Protótipo finalizado do sistema de automação microclimática durante o período de testes laboratoriais.



Fonte: Autoria própria (2026).

Embora os testes tenham sido realizados continuamente ao longo de 24 horas, os gráficos apresentados nas seções seguintes correspondem a intervalos representativos dos dados coletados. A seleção desses períodos teve como objetivo evidenciar com maior clareza o comportamento das variáveis monitoradas e a resposta dos atuadores frente às alterações ambientais, facilitando a análise do desempenho do sistema de controle implementado.

5.2 Desempenho do Sistema de Controle

O desempenho do sistema de controle foi avaliado por meio do monitoramento contínuo das variáveis de temperatura e umidade relativa do ar durante os ensaios. O microcontrolador ESP32 demonstrou elevada estabilidade operacional e capacidade de processamento na aquisição, tratamento e exibição em tempo real dos dados ambientais coletados pelos sensores instalados na estufa.

A lógica de controle implementada em malha fechada permitiu o processamento local das informações e o gerenciamento automático dos dispositivos responsáveis pela climatização do ambiente. Dessa forma, o sistema foi capaz de responder às variações das condições microclimáticas monitoradas, executando ações de controle com o objetivo de manter os parâmetros ambientais próximos aos valores de referência estabelecidos para o cultivo.

Sistemas automatizados de controle ambiental baseados em monitoramento contínuo possibilitam respostas mais rápidas e precisas às perturbações do ambiente, contribuindo para a manutenção de condições mais estáveis e adequadas ao desenvolvimento vegetal. (OSORES *et al*, 2018)

A visualização imediata dessas condições internas foi implementada por meio de uma interface física com display LCD. A figura 32 ilustra o dispositivo em pleno funcionamento operacional, exibindo as leituras simultâneas de temperatura, umidade relativa do ar, o valor calculado do VPD, além de informações de diagnóstico como o estado do sistema ("Status: OK") e a etapa fenológica ativa ("Fase: VEGA").

Figura 31 - Interface física em display LCD exibindo os parâmetros locais de controle na fase vegetativa.



Fonte: Autoria própria (2026).

Inicialmente, foram realizados testes de monitoramento da temperatura em condições normais de operação, sem a aplicação de fontes externas de calor. A figura 33 apresenta os dados obtidos durante esse período. Observa-se que os valores registrados permaneceram relativamente estáveis, apresentando apenas pequenas oscilações decorrentes das condições naturais do ambiente de ensaio, entre 20,16°C e 20,21°C. Esse comportamento demonstra a capacidade do sensor em realizar medições consistentes e evidencia a estabilidade do sistema de aquisição de dados implementado.

Figura 32 - Monitoramento da temperatura em condições normais de operação.



Fonte: Autoria própria (2026)

Com o objetivo de avaliar a capacidade de resposta do sistema diante de alterações térmicas, foi realizado um segundo ensaio utilizando uma fonte de calor externa próxima ao sensor. Conforme ilustrado na figura 34, observou-se um aumento imediato dos valores de temperatura registrados, evidenciando a elevada sensibilidade do sistema à variação da grandeza monitorada. Após a remoção da fonte de calor, os valores retornaram gradualmente à condição inicial, demonstrando a capacidade do sensor e do microcontrolador em detectar e processar rapidamente alterações ambientais.

Figura 33 - Resposta do sistema ao aumento induzido de temperatura

Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados obtidos nos ensaios térmicos indicam que o conjunto formado pelo sensor e pelo ESP32 apresentou desempenho satisfatório tanto na detecção de pequenas oscilações ambientais quanto em situações de mudanças abruptas de temperatura. Essa característica é fundamental para sistemas de automação agrícola, nos quais a identificação rápida de desvios ambientais possibilita a adoção de ações corretivas de forma automatizada.

Em seguida, foram realizados testes para avaliação do comportamento do sistema em relação à umidade relativa do ar. Inicialmente, o sensor operou sob as condições normais do ambiente, registrando apenas as pequenas variações naturais da umidade. Conforme apresentado na figura 35, os valores permaneceram estáveis durante o período de monitoramento, demonstrando a confiabilidade das medições realizadas.

Figura 34 - Monitoramento da umidade em condições normais de operação.

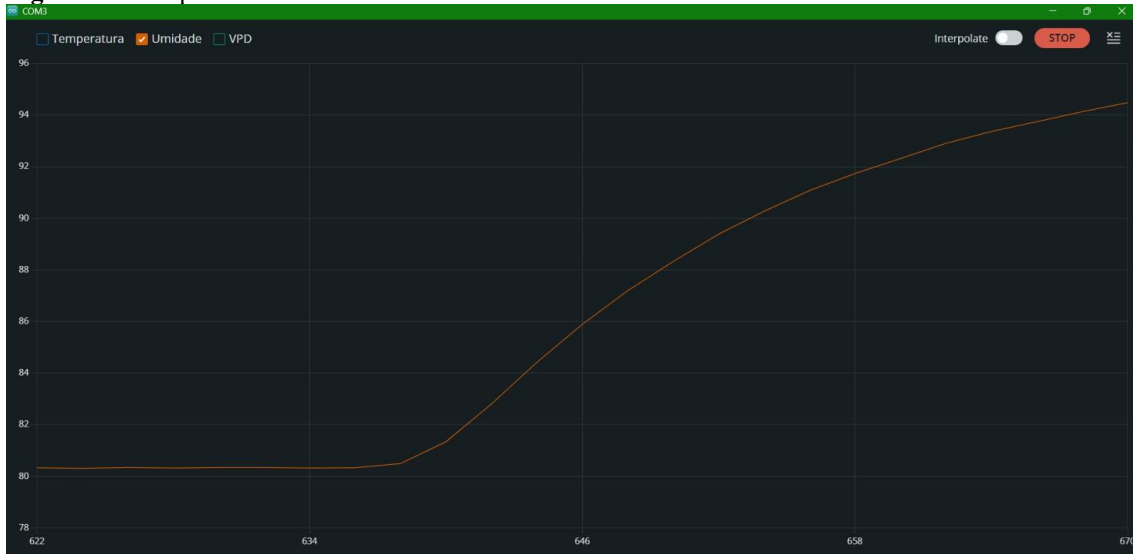


Fonte: Autoria própria (2026)

A partir da análise da figura 35, nota-se que a umidade relativa do ar se manteve altamente estabilizada em regime permanente, apresentando oscilações residuais restritas à faixa entre 80,43% e 80,51%.

Posteriormente, foi realizado um ensaio de aumento induzido da umidade utilizando um pano umedecido próximo ao sensor. A figura 36 apresenta os resultados obtidos durante esse procedimento. Observa-se uma elevação significativa dos valores registrados, demonstrando a capacidade do sistema em detectar rapidamente alterações na concentração de vapor d'água presente no ambiente.

Figura 35 - Resposta do sistema ao aumento induzido de umidade.



Fonte: Autoria própria (2026)

O estímulo úmido externo provocou uma rampa de subida na curva de leitura evidenciando a elevada sensibilidade do sistema à variação da grandeza monitorada, conforme visto na figura 36. Esse acréscimo abrupto na umidade foi detectado pela lógica de controle, que acionou automaticamente os atuadores responsáveis pela renovação do ar, demonstrando a capacidade do sistema em responder a perturbações ambientais. Imediatamente, a lógica de malha fechada detectou o desvio e acionou os atuadores de exaustão para forçar a renovação do ar e mitigar o excesso de vapor d'água.

Após a remoção da fonte de umidade induzida e com os atuadores em pleno funcionamento, monitorou-se o comportamento de recuperação do ambiente, apresentado na figura 37.

Figura 36 - Resposta do sistema à redução e estabilização da umidade após a atuação dos componentes.



Fonte: Autoria própria (2026)

Os resultados demonstram que o sistema apresentou sensibilidade adequada para o monitoramento da umidade relativa do ar, respondendo de forma consistente tanto às pequenas oscilações ambientais quanto às variações induzidas. Tal característica é essencial para aplicações de controle microclimático, uma vez que a umidade relativa exerce influência direta sobre o cálculo do VPD e, conseqüentemente, sobre as condições de desenvolvimento das plantas.

5.3 Precisão das Medições e Estabilidade do VPD

A precisão das medições de temperatura e umidade relativa do ar desempenha papel fundamental no desempenho do sistema proposto, uma vez que essas variáveis são utilizadas para o cálculo do VPD, principal parâmetro adotado para o controle microclimático da estufa. A manutenção do VPD dentro das faixas adequadas para cada fase fenológica favorece os processos fisiológicos da planta, contribuindo para o desenvolvimento saudável da cultura e para a otimização da absorção de água e nutrientes, de modo a evitar estresses abióticos e garantir a máxima eficiência fotossintética. (RODRÍGUEZ-YZQUIERDO et al., 2021).

Diferentemente de sistemas convencionais que utilizam apenas limites fixos de temperatura e umidade, o sistema desenvolvido realiza o controle considerando a interação entre essas variáveis para a determinação do VPD. O cálculo do VPD programado no firmware do microcontrolador ESP32 fundamentou-se na Equação de Tetens. Por meio dessa formulação matemática, executada

localmente a cada ciclo de execução do firmware embarcado no ESP32, o algoritmo processa as leituras de temperatura e umidade relativa do ar, determinando continuamente o valor instantâneo do VPD do ambiente monitorado. O monitoramento contínuo e o processamento das variáveis ambientais constituem elementos fundamentais para o desenvolvimento de sistemas automatizados aplicados à agricultura de precisão. (JÚNIOR, 2016).

O algoritmo embarcado no microcontrolador ESP32 processa continuamente as leituras de temperatura e umidade relativa do ar fornecidas pelo sensor SHT31, calculando o VPD instantâneo e comparando-o com as faixas ideais previamente configuradas para cada fase fenológica do cultivo. A partir dessa análise, o sistema executa automaticamente ações corretivas com o objetivo de manter o microclima dentro das condições mais adequadas ao desenvolvimento vegetal. Dessa forma, as decisões de controle e o gerenciamento automático dos dispositivos de climatização são realizados com base em uma variável fisiologicamente mais representativa das necessidades do cultivo, buscando manter o microclima dentro da faixa ideal configurada para cada estágio de desenvolvimento.

A figura 38 apresenta o comportamento do VPD durante um período de estabilidade ambiental, sem a aplicação de fontes externas de perturbação.

Figura 37 - Comportamento do VPD em regime estável de operação.



Fonte: Autoria própria (2026)

A análise da figura 38 revela que os valores calculados permaneceram estáveis e próximos à faixa de referência estabelecida para a fase vegetativa ("VEGA"), apresentando valor médio de

aproximadamente 0,46 kPa. Esse comportamento demonstra a consistência das medições realizadas pelos sensores e a capacidade do sistema em manter condições ambientais adequadas ao cultivo. O controle adequado do VPD desempenha papel importante nos processos fisiológicos das plantas, influenciando diretamente a transpiração e as trocas gasosas. Nesse contexto, a manutenção do VPD próximo da faixa de referência definida para essa etapa fenológica indica que o sistema foi capaz de fornecer condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal durante o período analisado, de modo indica que o sistema foi capaz de fornecer condições favoráveis ao desenvolvimento vegetal durante o período analisado. (RODRÍGUEZ-YZQUIERDO et al., 2021).

Embora o comportamento apresentado na figura 38 demonstre a estabilidade do sistema em condições normais de operação, foram analisadas situações de ajuste dinâmico do microclima, nas quais pequenas variações de temperatura e umidade provocaram oscilações controladas no valor calculado do VPD. O comportamento observado nessas condições é apresentado na figura 39.

Figura 38 - Oscilações controladas do VPD durante o processo de ajuste ambiental.



Fonte: Autoria própria (2026).

Conforme observado na figura 39, o VPD apresentou pequenas oscilações, variando aproximadamente entre 0,520 kPa e 0,530 kPa. Apesar dessas flutuações, os valores permaneceram dentro de uma faixa extremamente estreita, demonstrando a eficiência da estratégia de controle implementada. Esse comportamento evidencia o funcionamento da malha fechada desenvolvida,

na qual o algoritmo monitora continuamente os desvios das variáveis ambientais em relação aos valores de referência e executa ações corretivas por meio dos atuadores de climatização.

A manutenção do VPD dentro das faixas pré-estabelecidas para cada fase fenológica demonstra que o sistema não apenas monitora as condições ambientais, mas também utiliza essas informações para auxiliar na criação de um ambiente mais adequado ao cultivo. Os resultados obtidos indicam que a combinação entre monitoramento em tempo real, processamento local e controle automatizado foi capaz de proporcionar elevada estabilidade microclimática, contribuindo para a aplicação dos princípios de agricultura de precisão descritos por (OLIVEIRA, 2024).

5.4 Análise de Viabilidade Econômica

A viabilidade econômica constitui um dos fatores mais relevantes para a adoção de sistemas automatizados de monitoramento e controle ambiental em aplicações de pequeno e médio porte. Nesse contexto, além da validação técnica do protótipo desenvolvido, realizou-se uma análise dos custos envolvidos na implementação da solução proposta, considerando os principais componentes eletrônicos, sensores, atuadores e materiais empregados na construção da estufa.

A Tabela 2 apresenta os componentes utilizados no desenvolvimento do sistema, bem como seus respectivos custos de aquisição.

Tabela 2 – Estimativa de custo

Componente/material	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Microcontrolador ESP32	1	R\$55,00	R\$55,00
Sensor SHT31	1	R\$22,00	R\$22,00
Módulo LDR	1	R\$5,00	R\$5,00
Módulo DS3231	1	R\$15,00	R\$15,00
Módulo Relé 8 canais	1	R\$37,00	R\$37,00
Display LCD 20 x 4	1	R\$35,00	R\$35,00
Chapa de MDF 15mm	6	R\$50,00	R\$300,00
Fonte de Alimentação 5V	1	R\$32,00	R\$32,00

Componente/material	Quantidade	Valor Unitário	Valor Total
Ventiladores	3	R\$37,99	R\$113,97
Desumidificador	1	R\$139,00	R\$139,00
Cabo <i>shield</i> 4x1mm ²	3m	R\$25,20	R\$75,60
Rodízio	4	R\$15,00	R\$60,00
Disjuntor 20A	1	R\$61,69	R\$61,69
Caixa de proteção	1	R\$25,90	R\$25,90
Cabo PP 3x2,5mm ²	3m	R\$15,24	R\$45,72
Horas trabalhadas	92h	R\$20,67	R\$1.901,64
Custo Total do Protótipo	-	-	R\$2.923,55

Fonte: Autoria própria, 2026.

A partir dos valores apresentados, verificou-se que o custo total de implementação do protótipo foi de aproximadamente R\$2.923,55. Considerando as funcionalidades incorporadas ao sistema, como monitoramento contínuo de temperatura e umidade relativa do ar, cálculo automático do VPD, processamento local por meio do microcontrolador ESP32 e acionamento automatizado dos dispositivos de climatização, o investimento realizado mostrou-se compatível com os objetivos propostos pelo projeto.

Quando comparado a soluções comerciais de automação para ambientes de cultivo protegido, o sistema desenvolvido apresenta potencial para oferecer uma alternativa de menor custo e maior flexibilidade de configuração. Além disso, a utilização de plataformas abertas de hardware e software, como o ESP32 e a Arduino IDE, contribui para a redução dos custos de implementação e manutenção, além de facilitar futuras expansões e adaptações do sistema.

Soluções baseadas em automação de baixo custo apresentam grande potencial para democratizar o acesso às tecnologias de agricultura de precisão. Nesse sentido, o protótipo desenvolvido demonstra viabilidade para aplicação em projetos acadêmicos e sistemas de cultivo de pequeno porte, permitindo o monitoramento e controle das variáveis microclimáticas sem a necessidade de investimentos elevados. (JÚNIOR, 2016).

Dessa forma, a análise realizada indica que o sistema desenvolvido apresenta viabilidade econômica para aplicações de monitoramento e controle microclimático, combinando baixo custo de implementação, flexibilidade operacional e capacidade de expansão. Tais características

reforçam o potencial da solução como ferramenta de apoio à agricultura de precisão e ao desenvolvimento de ambientes de cultivo controlado.

CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um sistema automatizado para monitoramento e controle em estufas, visando a manutenção de condições ambientais adequadas ao cultivo de cannabis medicinal por meio do controle do VPD. Os resultados obtidos demonstraram que o protótipo desenvolvido foi capaz de monitorar continuamente as variáveis e acionar automaticamente os dispositivos de controle, proporcionando maior estabilidade ao ambiente de cultivo.

A revisão bibliográfica realizada evidenciou que o VPD é um dos parâmetros mais importantes para o cultivo de Cannabis em ambientes controlados, pois influencia diretamente processos fisiológicos fundamentais, como a transpiração, a absorção de água e nutrientes, a abertura estomática e a eficiência fotossintética. Dessa forma, a manutenção das condições ideais dentro das faixas recomendadas para cada estágio fenológico da planta, contribui para um crescimento mais saudável, melhor desenvolvimento estrutural e maior produção de biomassa.

Durante o desenvolvimento do projeto, verificou-se que a integração entre sensores de temperatura e umidade, microcontrolador ESP32, comunicação I2C e atuadores possibilitou a construção de uma solução funcional, acessível e alinhada aos princípios da agricultura de precisão. A automação permitiu reduzir a necessidade de monitoramento manual constante, aumentar a confiabilidade das medições e proporcionar respostas rápidas às variações ambientais observadas no interior da estufa.

Outro aspecto relevante está relacionado ao potencial impacto econômico da tecnologia desenvolvida. Atualmente, grande parte dos medicamentos à base de cannabis medicinal disponíveis no Brasil depende da importação de insumos ou produtos acabados, o que contribui significativamente para o elevado custo dos tratamentos. Nesse contexto, o desenvolvimento de tecnologias nacionais voltadas ao cultivo controlado pode contribuir para a viabilização do autocultivo e da produção local, reduzindo custos operacionais e ampliando o acesso à cannabis medicinal para pacientes que dependem desses tratamentos. A utilização de componentes acessíveis e amplamente disponíveis demonstra a viabilidade de soluções tecnológicas de menor custo quando comparadas aos sistemas comerciais importados.

Conclui-se, portanto, que os objetivos propostos foram alcançados. Foi realizada a integração de sensores para o monitoramento das variáveis ambientais da estufa, os custos total do

projeto se manteve abaixo do valor máximo esperado e foi possível projetar e implementar o controlador a uma estrutura física real de uma a estufa.

O sistema desenvolvido demonstrou viabilidade técnica para o monitoramento e controle das variáveis ambientais associadas ao VPD, apresentando potencial aplicação em cultivos indoor de cannabis medicinal. Além disso, o projeto evidencia como a integração entre automação industrial, sistemas embarcados e agricultura de precisão pode contribuir para a melhoria da qualidade do cultivo, para a padronização do ambiente produtivo e para o fortalecimento de iniciativas voltadas à produção nacional de cannabis medicinal.

Como continuidade deste trabalho, recomenda-se a implementação de um sistema supervisório remoto mais completo, permitindo o monitoramento e o gerenciamento da estufa em tempo real por meio de computadores, smartphones e dispositivos conectados à internet. Esse sistema poderá disponibilizar gráficos históricos, alarmes, registros de eventos, relatórios automáticos e configurações remotas dos parâmetros de operação, aumentando a confiabilidade e a rastreabilidade do processo produtivo.

Outra melhoria consiste na implementação do cálculo automático do Déficit de Pressão de Vapor (VPD) diretamente na interface supervisória, permitindo que o operador visualize esse indicador em tempo real. Dessa forma, as tomadas de decisão poderiam ser realizadas com base em um parâmetro fisiológico mais preciso, facilitando o ajuste das condições ambientais de acordo com cada estágio de desenvolvimento da planta.

Também é recomendada a integração de um sistema automatizado de irrigação com reservatório de água dedicado. Esse sistema poderá utilizar sensores de nível para monitoramento do tanque e sensores de umidade do solo para determinar o momento ideal da irrigação. A utilização de bombas controladas automaticamente permitirá fornecer água de forma precisa, reduzindo desperdícios e minimizando a necessidade de intervenções manuais. Além disso, a integração entre irrigação e monitoramento climático permitirá um controle mais eficiente do balanço hídrico da cultura, favorecendo a absorção de nutrientes, a transpiração e o desenvolvimento saudável das plantas.

Outra possibilidade de evolução da tecnologia proposta está relacionada à sua aplicação em operações de maior escala. Embora o protótipo desenvolvido utilize exaustores e dispositivos de ventilação adequados para ambientes compactos e cultivos de pequeno porte, produções comerciais

demandam sistemas de climatização mais robustos para garantir a estabilidade ambiental em salas inteiras de cultivo.

Nesse contexto, a arquitetura de automação desenvolvida neste trabalho pode ser adaptada para atuar em conjunto com sistemas HVAC (Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado), amplamente utilizados em instalações agrícolas e farmacêuticas de grande porte. A integração do controlador com equipamentos de climatização industrial possibilitaria um controle mais preciso da temperatura, da umidade relativa do ar e, conseqüentemente, do VPD, reduzindo oscilações ambientais e aumentando a uniformidade das condições de cultivo.

Por fim, sugere-se a incorporação de sensores adicionais, como medidores de dióxido de carbono (CO_2), pH, condutividade elétrica e umidade do substrato, bem como o desenvolvimento de algoritmos inteligentes capazes de realizar ajustes preditivos das condições ambientais. Essas melhorias ampliarão a autonomia e a precisão do sistema, consolidando-o como uma plataforma completa de agricultura de precisão voltada ao cultivo de cannabis medicinal em diferentes escalas de produção.

DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA
(atendendo à Portaria CNPq nº 2.664/2026)

O(s) autor(es) deste trabalho declara(m) que foram utilizadas as seguintes ferramentas de Inteligência Artificial Generativa:

NotebookLM (desenvolvida por Google, versão/data: Junho de 2026) – Finalidade: Auxílio na organização de notas de leitura, cruzamento de insights de fontes bibliográficas e suporte na estruturação lógica do texto – Aplicada na(s) seção(ões): Introdução, Revisão da Literatura e Metodologia.

Gemini (desenvolvida por Google, versão 1.5 / Junho de 2026) – Finalidade: Revisão estilística, aprimoramento da coesão e coerência textual, e reestruturação de frases para maior clareza – Aplicada na(s) seção(ões): Introdução e Revisão da Literatura.

ChatGPT (desenvolvida por OpenAI, versão GPT-4o / Junho de 2026) – Finalidade: Refinamento gramatical, sugestão de conectivos para transição entre parágrafos e polimento para ganho de fluidez textual – Aplicada na(s) seção(ões): Introdução e Revisão da Literatura.

Os autores declaram que revisaram integralmente todo o conteúdo gerado ou auxiliado por essas ferramentas e assumem total responsabilidade pela originalidade, exatidão e conformidade ética do trabalho apresentado.

REFERÊNCIAS

ADAMCHUK, V. I. *et al.* On-the-go soil sensors for precision agriculture. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 44, p. 71–91, 2004.

AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA – ANVISA (Brasil). Resolução nº 03, de 26 de janeiro de 2015. Dispõe sobre a atualização do Anexo I, Listas de Substâncias Entorpecentes, Psicotrópicas, Precursoras e Outras sob Controle Especial, da Portaria SVS/MS nº 344, de 12 de maio de 1998. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 jan. 2015. Seção 1.

AZEVEDO, Humberto Caiado. **Cultivo de *Cannabis sativa* Cannabaceae (Linnaeus, 1753): métodos agrônômicos para a produção sustentável no Brasil**. 2025. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Cidade de Goiás, Goiás, GO, 2025.

JUNIOR, Amber Leite de Azevedo. **Sistema de monitoramento e climatização de estufa de pequeno porte em um contexto doméstico**. 2016.

BAILLE, A. *et al.* Greenhouse climate control: methods and results. **Acta Horticulturae**, v. 719, p. 43–54, 2006.

BARROS, Francisca Neuvânia de Paula. **Uma taxonomia para ambiente de desenvolvimento integrado baseada em entidades**. 2025.

BISNETA, Joana Dantas de Castro; MUÑOZ, Maria Luisa de Brito; MACHADO, Ana Lúcia Soares. Dispositivo para cultivo indoor de plantas. **Revista Foco** |Curitiba (PR)|, v. 17, n. 5, e5049, p. 01-17, 2024.

CAMPOS, E. A história da Cannabis e a sua situação legal no Brasil. **Rev Consultor Jurídico**, 2020. Disponível em: [URL removida]. Acesso em: 26 maio 2022.

CANNATROL launches first-ever precision cannabis drying, curing system. **Terpenes and Testing Magazine**, [S. l.], 26 jun. 2019. Disponível em: <https://terpenesandtesting.com/cannatrol-launches-first-ever-precision-cannabis-drying-curing-system/>. Acesso em: 12 dez. 2024.

CARVALHO, N. A.; BEZERRA, H. DE M.; NETTO, A. J.; ROCHA, M. L. Controle de uma Estufa Agrícola Utilizando Controlador Lógico Programável. In: ENCONTRO DE ESTUDANTES DE INFORMÁTICA DO TOCANTINS, 11., 2009, Palmas. **Anais** [...]. Palmas: Centro Universitário Luterano de Palmas, 2009. p. 131-140.

CERVANTES, Jorge. **Marijuana: Horticulture: The Indoor/Outdoor Medical Grower's Bible**. 1. ed. Vancouver, WA: Van Patten Publishing, 2007.

CONGRESSO NACIONAL (Brasil). Projeto de Lei nº 399, de 23 de fevereiro de 2015. Altera o **artigo 2º da Lei 11.343**, de 23 de agosto de 2006, para viabilizar a comercialização de medicamentos que contenham extratos, substratos ou partes da planta *Cannabis sativa* em sua formulação. Coordenação de Comissões Permanentes – DECOM- P_ 7696. Proposta sujeita à apreciação do Plenário.

CORTES, Arthur Pinheiro et al. **Controle e supervisão da umidade em estufa de plantas baseado em arduino**. 2017.

ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32*. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>. Acesso em: 1 nov. 2025..

FILGUEIRA, Fernando A. R. **Novo Manual de Olericultura**: agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças. Viçosa: UFV, 2008.

FIORENTINO, N. et al. Editorial: Environmental and agronomic factors affecting the chemical composition and biological activity of cannabis extracts. **Frontiers in Plant Science**, [S. l.], v. 15, 2024. DOI: 10.3389/fpls.2024.1407262. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38693924/>. Acesso em: 24 out 2025.

FUGII, S. Y. Acesso aos tratamentos à base de cannabis sativa: procedimento judicial. **Rev Consultor Jurídico**, 2021. Disponível em: [URL removida]. Acesso em: 26 maio 2022.

GALAN, Larissa Cassiano. **Controle e monitoramento em tempo real de uma estufa para o cultivo de hortaliças**. 2025.

GIL, Antonio Carlos. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GRECCO, M. Cannabis: 6 tendências globais para o uso medicinal e industrial. **IstoÉ Dinheiro**, 2020. Disponível em: [URL removida]. Acesso em: 14 maio 2022.

GROSSO, A. Cannabis: from plant condemned by prejudice to one of the greatest therapeutic options of the century. **Rev J Hum Growth**, v. 30, n. 1, p. 94-7, 2020.

HERRERA, J. et al. Analysis of cannabinoids in medicinal cannabis products: a comprehensive review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, [S. l.], v. 35, n. 10, 2024. DOI: 10.21577/0103-5053.20240129. Disponível em: https://jbc.sbq.org.br/pdf/2024-0170RV_MedChem. Acesso em: 12 dez. 2024.

HESAMI, M. et al. Morphological Characterization of *Cannabis sativa* L. Throughout Its Complete Life Cycle. **Plants (Basel)**, [S. l.], v. 12, n. 20, p. 3646, 2023. DOI: 10.3390/plants12203646. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37896109/>. Acesso em: 18 ago. de 2025.

JÚNIOR, José Jair Alves Mendes; JUNIOR, Sérgio Luiz Stevan. Ldr e sensores de luz ambiente: Funcionamento e aplicações. **Semana de Eletrônica e Automação, Paraná**, 2013.

KATSOUULAS, N. *et al.* Crop transpiration and energy balance in a greenhouse: The effect of ventilation. **Biosystems Engineering**, v. 104, n. 3, p. 291–307, 2009.

KAYA MIND. **Tabela de VPD para cultivo de cannabis**. São Paulo: Kaya Mind, 2025.

LEIBSON, Steven. **A History of Early Microcontrollers, Part 2: The Texas Instruments TMS1000**. EEJournal, 21 nov. 2022. Disponível em: <https://www.eejournal.com/article/a-history-of-early-microcontrollers-part-2-the-texas-instruments-tms1000/>. Acesso em: 1 mai. 2026.

LUZ, Pedro Braga. **Automatização de estufa para controle de ambiente de cultivo de plantas em contexto residencial**. 2022. 80 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2022.

MAKERHERO. Módulo relé 3,3 V 8 canais. Disponível em: <https://www.makerhero.com/produto/modulo-rele-3-3v-8-canais/>. Acesso em: 20 abr. 2026.

MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2021.

MARGOLIS, Michael. **Arduino Cookbook - Recipes to Begin, Expand and Enhance Your Projects**. Sebastopol: O'Reilly, 2011.

MARTINS, Denise do Amaral; POSSO, Irimar de Paula. Legislação atual sobre cannabis medicinal. Histórico, movimentos, tendências e contratendências no território brasileiro. **BrJP**, v. 6, p. 75-79, 2023.

MIYADAIRA, Alberto. **Microcontroladores PIC 18**. 4. ed. rev. e atual. São Paulo: Érica, [s.d.]. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=lang_pt&id=7YqwDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT3&dq=microcontroladores&ots=aF7gckr3Wh&sig=pyAnzcFNyLPwq-LZOh2fhs2y0JU#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 01 de nov. 2025.

MONK, Simon. **Movimento, luz e som com Arduino e Raspberry Pi**. Novatec Editora, 2016.

OLIVEIRA, Richard Stanley Mota de. **Sensoriamento para a agricultura de precisão: embarcados para aeromodelos**. 2024.

OSORES, César da Silva et al. Sistema de climatização em estufa. 2018.

PEZZOPANE, J. E. M.; ORTOLANI, A. A.; GODOY-GENTIL, J.; PEZZOPANE, J. R. M. *Influence of the land-sea breeze on the saturation period of the relative humidity inside two adult rubber tree plantations in Ubatuba, state of São Paulo, Brazil*. **Bragantia**, Campinas, v. 55, n. 1, p. 201-205, 1996.

PIEROZAN, C. *et al.* Agricultura de precisão: conceitos e aplicações. **Revista Eletrônica Científica da UERGS**, v. 4, n. 3, p. 353–367, 2018.

PLATFORMIO. O que é PlatformIO ?. 2025 Disponível em: <https://docs.platformio.org/en/latest/what-is-platformio.html>. Acesso em: 08 nov. 2025.

RODRÍGUEZ-YZQUIERDO *et al*, Mónica. Caracterização fisiológica em plantas de Cannabis medicinal durante etapas distintas fenológicas bajo estrés biótico. **Agronomia Mesoamericana**, p. 823-840, 2021.

ROMANINI, Carlos E. B. et al. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 14, n. 11, p. 1193–1201, 2010.

SALONER, A.; BERNSTEIN, N. Nitrogen supply affects cannabinoid and terpenoid profile in medical cannabis (*Cannabis sativa* L.). **Industrial Crops and Products**, v. 167, p. 113516, 2021. DOI: 10.1016/j.indcrop.2021.113516. Disponível em: <https://sci-hub.se/downloads/2021-06-09/77/saloner2021.pdf>. Acesso em: 25 out 2025.

SANTOS, Bernardo Schmitz dos. **Estudo de um protótipo para controle e monitoramento em uma estufa de hortaliças baseado em internet das coisas e o microcontrolador ESP8266**. 2020.

SANTOS, ORLEM LD; JUNIOR, JODSM; NEVES, MENDELSSON RM. Sistema de Controle de Temperatura para uma Estufa com Monitoramento via Aplicativo. **RCT**, v. 3, n. 4, 2017.

SENSIRION. SHT3x – Digital Humidity & Temperature Sensor (RH/T) 2016 Datasheet. Disponível em: <https://sensirion.com>.

SHAMSHIRI, R. R. *et al*. Advances in greenhouse automation and controlled environment agriculture: A transition to plant factories and urban agriculture. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 11, n. 1, p. 1–22, 2018.

SILVA, Eduardo Texeira da et al. Comportamento da temperatura do ar sob condições de cultivo em ambiente protegido. [S. l.: s. n.], 2017.

SILVA, Kátia Lopes; FRANCO, Matheus Moreira; FERRARI, Hélio Oliveira; GAZZANI, Mauro Hemerly. Desenvolvimento de controles automatizados em estufas agrícolas. **Intercursos – Revista Científica**, v. 22, n. 1, p. 86-107, 2023.

SMALL, E. Classification of *Cannabis sativa* L. in Relation to Agricultural, Biotechnological, Medical and Recreational Utilization. In: CHANDRA, S.; LATA, H.; ELSOHLY, M. (ed.). **Cannabis sativa L. - Botany and Biotechnology**. Cham, Alemanha: Springer, 2017. p. 1-18. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-54564-6_1. Acesso em: 23 out. 2024.

SOMBRIO, Yuri Machado. **Um estudo comparativo entre placas e ambientes de desenvolvimento em um contexto mecatrônico**. 2021.

SOUZA, A R; PAIXÃO, A C; UZÊDA, D D; DIAS, M A; DUARTE, S; AMORIM, H S. A Placa Arduino: uma opção de baixo custo para experiências de física assistidas pelo PC. **Revista**

Brasileira de Ensino de Física, v.33, n.1, 1702. Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2011.

SPEZZIA, S. O emprego da cannabis medicinal no enfrentamento à doenças. **Rev Ciênc Med**, v. 31, e225398, 2022.

STJ. STJ valida cultivo medicinal da cannabis por empresas e dá prazo para regulamentação. 2025. Disponível

em: <https://www.stj.jus.br/sites/portalp/Paginas/Comunicacao/Noticias/2024/14112024-STJ-valida-cultivo-medicinal-da-cannabis-por-empresas-e-da-prazo-para-regulamentacao.aspx>.

Acesso em: 26 out. 2025.

SUNDMAEKER, H. *et al.* Internet of Food and Farm 2020. In: VERMESAN, O.; FRIESS, P. (Org.). **Digitising the Industry – Internet of Things Connecting the Physical, Digital and Virtual Worlds**. Aalborg: River Publishers, 2016. p. 129–151.

TARASSI, Roberto Terumi. **Modelagem do microclima em casa-de-vegetação**. 2000. 96 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

TECNODIGITAL. Visual Studio Code: tudo o que você precisa saber sobre o editor mais versátil. 2025. Disponível em: <https://informatecdigital.com/pt/O-que-%C3%A9-o-Visual-Studio-Code/>. Acesso em: 08 nov. 2025.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro. **Sensores industriais: Fundamentos e aplicações**. 9. ed. São Paulo: [s. n.], 2020.

TRANCOSO, I. *et al.* Cannabis sativa L.: Crop Management and Abiotic Factors That Affect Phytocannabinoid Production. **Agronomy**, [S. l.], v. 12, p. 1492, 2022. DOI:

10.3390/agronomy12071492. Disponível

em: https://www.researchgate.net/publication/361465603_Cannabis_sativa_L_Crop_Management_and_Abiotic_Factors_That_Affect_Phytocannabinoid_Production. Acesso em: 01 nov 2025.

TRINDADE, Eloês de Fátima; MOURAD, Leonice. **As relações entre a extensão rural e os agricultores tradicionais**. [S.l.: s.n.], 2024. Disponível

em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/373/2019/06/Regional_Santa_Maria_2013-3-2.pdf.

Acesso em: 02 nov 2025.

YANG, Jiaqiang *et al.* An intelligent greenhouse control system. **TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)**, v. 11, n. 8, p. 4627–4632, ago. 2013. Disponível

em: https://www.researchgate.net/publication/274477475_An_Intelligent_Greenhouse_Control_System.

em: https://www.researchgate.net/publication/274477475_An_Intelligent_Greenhouse_Control_System. Acesso em: 6 set. 2025.

ZHANG, N *et al.* Precision agriculture—A worldwide overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 36, n. 2-3, p. 113–132, 2002.

ZHOU, Wei; WANG, Jun; CHEN, Jun. Design of solar greenhouse environmental monitoring and control on the basis of multinode data fusion. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, n. 6, p. 396–402, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/p8bg4fgphpmYnrH9dHr89z/?lang=en>. Acesso em: 6 set. 2025.

APENDICE A – CÓDIGO FONTE DO CONTROLADOR DESENVOLVIDO

```
//
```

```
=====
```

```
//      SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE MICROCLIMA BASEADO NO  
VPD
```

```
//
```

```
=====
```

```
// Projeto de Conclusão de Curso (TCC)
```

```
// Autores: Gabriel Bosco, Gustavo Vaz, Lucas Bastos, Lucas de Andrade
```

```
// Descrição: Controlador automatizado baseado em Déficit de Pressão de Vapor (VPD)
```

```
//      com fotoperíodo via RTC, debounce por software e feedback de lâmpada via LDR.
```

```
//
```

```
=====
```

```
#include <Wire.h>          // Biblioteca para comunicação I2C (Pinos SDA/SCL)
```

```
#include <RTClib.h>       // Biblioteca para controle do Relógio de Tempo Real (RTC)
```

```
#include <Adafruit_SHT31.h> // Biblioteca para leitura do sensor de clima SHT31
```

```
#include <LiquidCrystal_I2C.h> // Biblioteca para controle do Display LCD via I2C
```

```
#include <math.h>         // Biblioteca matemática (usada para cálculo de exponencial)
```

```
//
```

```
=====
```

```
// 1. MAPEAMENTO DE HARDWARE (PINAGEM DO ESP32)
```

```
//
```

```
=====
```

```

// Atuadores digitais (Saídas para os Módulos de Relé)
#define FAN1 2          // Exaustor/Ventilador Principal (Estágio 1)
#define FAN2 15         // Ventilador Auxiliar (Estágio 2)
#define FAN3 18         // Ventilador Auxiliar (Estágio 3)
#define DESUM 19        // Comando do Desumidificador de ar
#define LAMP 5          // Comando do sistema de iluminação (Lâmpada/LED)

// Entradas Digitais (Botões e Sensores de nível)
#define BTN_FASE 25     // Botão de pressão para troca manual de fase
#define BTN_RESERVATORIO 27 // Sensor de nível tipo boia do desumidificador

// Entradas Analógicas (Sensores de luminosidade)
#define PIN_LDR 32     // Sensor LDR para monitorar o status real da lâmpada

//
=====
=====

// 2. INSTANCIÇÃO DOS OBJETOS (DRIVERS DE PERIFÉRICOS)
//
=====
=====

RTC_DS3231 rtc;          // Inicializa o chip de tempo real DS1307
Adafruit_SHT31 sht31 = Adafruit_SHT31(); // Inicializa o sensor de clima SHT31
(Endereço I2C)
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // Configura o Display LCD no endereço 0x27 (20
colunas x 4 linhas)

//
=====
=====

// 3. VARIÁVEIS GLOBAIS E MÁQUINAS DE ESTADOS

```

```
//
```

```
=====
```

```
// Definição dos Estados do Ciclo de Cultivo
```

```
enum Fase {VEG, FLOR, FIN}; // Estados possíveis: Vegetativo, Floração e
Finalização/Secagem
```

```
Fase faseAtual = VEG; // Inicializa o sistema na fase Vegetativa
```

```
// Definição dos Estados do Controle de Umidade (Baseado no VPD)
```

```
enum EstadoVPD {UMIDO, IDEAL, SECO}; // Estados de diagnóstico do ar
```

```
EstadoVPD estadoVPD = IDEAL; // Inicializa o controle considerando o ambiente como ideal
```

```
// Diagnóstico climático complementar
```

```
enum DiagnosticoClima {CLIMA_NORMAL, EXCESSO_UMIDADE,
BAIXA_TEMPERATURA, ALTA_TEMPERATURA, AMBIENTE_SECO};
```

```
DiagnosticoClima diagnostico = CLIMA_NORMAL;
```

```
// Filtro de Ruído Elétrico (Debounce por Software) do Botão de Fase
```

```
bool ultimoEstadoBotao = HIGH; // Armazena o último estado lido do botão (Inicia em HIGH
devido ao Pull-Up)
```

```
unsigned long ultimoTempoDebounce = 0; // Guarda o tempo em milissegundos da última
oscilação do botão
```

```
unsigned long atrasoDebounce = 50; // Tempo de estabilização necessário para validar o clique
(50ms)
```

```
// Controle de pressionamento longo
```

```
unsigned long tempoInicioPressionado = 0;
```

```
bool botaoSegurando = false;
```

```
bool comandoLongoExecutado = false;
```

```

// Sinalizadores de Modo e Falhas (Flags de Sistema)
bool modoManual = false;    // false = Controlado por data (RTC) | true = Usuário forçou pelo
                             botão
bool sensorErro = false;    // Sinaliza se o sensor SHT31 foi desconectado ou falhou
bool reservatorioCheio = false; // Sinaliza se a água do desumidificador atingiu o limite
bool erroLampada = false;   // Sinaliza divergência entre o comando do relé e a leitura real do
                             LDR

//Debounce do sensor do reservatório
bool ultimoEstadoReservatorio = HIGH;
unsigned long ultimoTempoReservatorio = 0;
unsigned long atrasoReservatorio = 200;

// Limites climáticos auxiliares
const float UR_ALTA = 80.0;
const float UR_BAIXA = 55.0;
const float TEMP_BAIXA = 20.0;
const float TEMP_ALTA = 32.0;

// Alertas Visuais (Variáveis auxiliares para piscar elementos, se necessário)
unsigned long tempoPisca = 0;
bool estadoPisca = false;

// Configurações Cronológicas do Ciclo (Tempo de duração de cada fase em dias)
DateTime dataInicio(2026, 5, 30, 0, 0, 0); // Data de plantio/start do ciclo (Ano, Mês, Dia, H, M,
S)
int diasVEG = 30;           // Tempo de duração do estágio vegetativo (em dias)
int diasFLOR = 60;         // Tempo de duração da floração (em dias)
int diasFIN = 10;         // Tempo de duração da secagem/finalização (em dias)

// Configuração do Fotoperíodo

```

```
int horaInicioLuz = 6;      // Define que as lâmpadas ligam sempre às 06h00min da manhã
```

```
//
```

```
=====
```

```
// 4. SUBROTINAS E FUNÇÕES DE CONTROLE
```

```
//
```

```
=====
```

```
/**
```

```
* Função: lerBotaoFase
```

```
* Descrição: Executa a varredura do botão físico, aplica o filtro de debounce para eliminar
```

```
* ruídos mecânicos e commuta a máquina de estados para o modo manual do usuário.
```

```
*/
```

```
void lerBotaoFase(){
```

```
    bool estadoAtual = digitalRead(BTN_FASE);
```

```
    // =====
```

```
    // INÍCIO DO PRESSIONAMENTO
```

```
    // =====
```

```
    if(estadoAtual == LOW && !botaoSegurando){
```

```
        tempoInicioPressionado = millis();
```

```
        botaoSegurando = true;
```

```
        comandoLongoExecutado = false;
```

```
    }
```

```
    // =====
```

```
// BOTÃO MANTIDO PRESSIONADO
// =====
if(estadoAtual == LOW && botaoSegurando){

if((millis() - tempoInicioPressionado >= 5000) &&
!comandoLongoExecutado){

DateTime agora = rtc.now();

switch(faseAtual){

case VEG:

dataInicio = agora;
break;

case FLOR:

dataInicio =
agora - TimeSpan(diasVEG, 0, 0, 0);
break;

case FIN:

dataInicio =
agora - TimeSpan(diasVEG + diasFLOR,
0, 0, 0);
break;
}

modoManual = false;
```

```
Serial.println("Modo Automatico Ativado");

comandoLongoExecutado = true;
}
}

// =====
// BOTÃO SOLTO
// =====

if(estadoAtual == HIGH && botaoSegurando){

    unsigned long tempoPressionado =
        millis() - tempoInicioPressionado;

    // Clique curto
    if(tempoPressionado < 5000 &&
        !comandoLongoExecutado){

        modoManual = true;

        switch(faseAtual){

            case VEG:
                faseAtual = FLOR;
                break;

            case FLOR:
                faseAtual = FIN;
                break;
```

```

    case FIN:
        faseAtual = VEG;
        break;
    }

    Serial.println("Modo Manual Ativado");
}

    botaoSegurando = false;
}
}

// -----

/*
 * Função: atualizaFasePeloRTC
 * Descrição: Realiza o avanço cronológico automático das fases de cultivo calculando os
 *             dias passados desde a data de início através da contagem absoluta do Unix Timestamp.
 */
void atualizaFasePeloRTC(DateTime agora) {
    if (modoManual) return; // Se o usuário interferiu pelo botão, ignora o relógio automático

    // Calcula a diferença em segundos entre o tempo atual e a data de inicialização do ciclo
    long long diferencaSegundos = agora.unixtime() - dataInicio.unixtime();

    // Proteção preventiva: se o relógio desconfigurar para antes do início, trava em VEG
    if (diferencaSegundos < 0) {
        faseAtual = VEG;
        return;
    }
}

```

```

// Converte a diferença de segundos para dias corridos inteiros (86400 segundos = 1 dia)
int diasPassados = diferencaSegundos / 86400;

// Determina a fase do ciclo com base nos dias acumulados
if (diasPassados < diasVEG) {
    faseAtual = VEG; // De 0 a 29 dias passados
}
else if (diasPassados < (diasVEG + diasFLOR)) {
    faseAtual = FLOR; // De 30 a 89 dias passados
}
else {
    faseAtual = FIN; // Acima de 90 dias passados
}
}

// -----

/**
 * Função: controleFotoperiodo
 * Descrição: Gerencia o tempo diário de ativação da iluminação da estufa de acordo com a
 * fase biológica atual estabelecida na máquina de estados.
 */
void controleFotoperiodo(DateTime agora){
    int duracaoLuz;

    // Carrega a regra de horas de luz exigida por cada estado biológico
    switch(faseAtual){
        case VEG: duracaoLuz = 18; break; // Fase vegetativa requer fotoperíodo longo (18h)
        case FLOR: duracaoLuz = 12; break; // Floração induzida por dias curtos (12h)
        case FIN: duracaoLuz = 12; break; // Finalização mantém dias curtos (12h)
    }
}

```

```

int horaAtual = agora.hour(); // Extrai apenas o valor da hora atual (0 a 23)

// Verifica se a hora do relógio está dentro da janela operacional de iluminação
if(horaAtual >= horaInicioLuz && horaAtual < horaInicioLuz + duracaoLuz)
    digitalWrite(LAMP, LOW); // Liga o relé dos painéis de iluminação
else
    digitalWrite(LAMP, HIGH); // Desliga o relé dos painéis de iluminação
}

// -----

/**
 * Função: calcularVPD
 * Descrição: Executa os cálculos matemáticos da termodinâmica para encontrar o VPD (kPa).
 *      Usa a Equação de Tetens para descobrir a pressão de vapor de saturação do ar.
 */
float calcularVPD(float temp, float ur){
    // SVP = Pressão de Vapor de Saturação (Capacidade máxima de retenção de água no ar a uma
    // dada Temp)
    float svp = 0.6108 * exp((17.27 * temp) / (temp + 237.3));

    // AVP = Pressão Real de Vapor (Quantidade de água real presente no ar)
    float avp = svp * (ur / 100.0);

    // O VPD é o déficit (a diferença) que falta para o ar saturar
    return svp - avp;
}

// -----

```

```
/**
 * Função: controleAmbiente
 * Descrição: Algoritmo de malha fechada com controle de Histerese. Avalia as condições
 * ambientais atuais, trata intertravamentos de segurança e aciona os atuadores.
 */
void controleAmbiente(float temp, float ur){

    if(sensorErro || reservatorioCheio){
        digitalWrite(FAN1, LOW);
        digitalWrite(FAN2, HIGH);
        digitalWrite(FAN3, HIGH);
        digitalWrite(DESUM, HIGH);
        return;
    }

    float vpd = calcularVPD(temp, ur);
    float vpdMin, vpdMax;
    float histerese = 0.02;

    switch(faseAtual){
        case VEG: vpdMin = 0.4; vpdMax = 0.8; break;
        case FLOR: vpdMin = 0.8; vpdMax = 1.2; break;
        case FIN: vpdMin = 1.1; vpdMax = 1.6; break;
    }

    switch(estadoVPD){
        case IDEAL:
            if(vpd < vpdMin - histerese) estadoVPD = UMIDO;
            else if(vpd > vpdMax + histerese) estadoVPD = SECO;
            break;
        case UMIDO:
```

```
    if(vpd > vpdMin + histerese) estadoVPD = IDEAL;
    break;
case SECO:
    if(vpd < vpdMax - histerese) estadoVPD = IDEAL;
    break;
}

diagnostico = CLIMA_NORMAL;

if(estadoVPD == UMIDO){
    if(ur >= UR_ALTA) diagnostico = EXCESSO_UMIDADE;
    else if(temp <= TEMP_BAIXA) diagnostico = BAIXA_TEMPERATURA;
}
else if(estadoVPD == SECO){
    if(temp >= TEMP_ALTA) diagnostico = ALTA_TEMPERATURA;
    else diagnostico = AMBIENTE_SECO;
}

switch(diagnostico){

case EXCESSO_UMIDADE:
    digitalWrite(FAN1, LOW);
    digitalWrite(FAN2, LOW);
    digitalWrite(FAN3, LOW);
    digitalWrite(DESUM, LOW);
    break;

case BAIXA_TEMPERATURA:
    if(faseAtual == VEG){
        digitalWrite(FAN1, LOW);
        digitalWrite(FAN2, HIGH);
```

```
    digitalWrite(FAN3, HIGH);
    digitalWrite(DESUM, HIGH);
} else {
    digitalWrite(FAN1, HIGH);
    digitalWrite(FAN2, HIGH);
    digitalWrite(FAN3, HIGH);
    digitalWrite(DESUM, LOW);
}
break;

case ALTA_TEMPERATURA:
    if(faseAtual == VEG){

        digitalWrite(FAN1, LOW);
        digitalWrite(FAN2, LOW);
        digitalWrite(FAN3, LOW);
        digitalWrite(DESUM, HIGH);
    }

    else if(faseAtual == FLOR){
        digitalWrite(FAN1, LOW);
        digitalWrite(FAN2, HIGH);
        digitalWrite(FAN3, HIGH);
        digitalWrite(DESUM, HIGH);
    }

    else {
        digitalWrite(FAN1, LOW);
        digitalWrite(FAN2, LOW);
        digitalWrite(FAN3, LOW);
        digitalWrite(DESUM, LOW);
```

```
}  
break;  
  
case AMBIENTE_SECO:  
    digitalWrite(FAN1, HIGH);  
    digitalWrite(FAN2, HIGH);  
    digitalWrite(FAN3, HIGH);  
    digitalWrite(DESUM, HIGH);  
    break;  
  
case CLIMA_NORMAL:  
    switch(faseAtual){  
        case VEG:  
            digitalWrite(FAN1, LOW);  
            digitalWrite(FAN2, HIGH);  
            digitalWrite(FAN3, HIGH);  
            digitalWrite(DESUM, HIGH);  
            break;  
        case FLOR:  
            digitalWrite(FAN1, LOW);  
            digitalWrite(FAN2, LOW);  
            digitalWrite(FAN3, HIGH);  
            digitalWrite(DESUM, HIGH);  
            break;  
        case FIN:  
            digitalWrite(FAN1, LOW);  
            digitalWrite(FAN2, HIGH);  
            digitalWrite(FAN3, LOW);  
            digitalWrite(DESUM, HIGH);  
            break;  
    }  
}
```

```

    break;
}
}

// -----

/**
 * Função: atualizarDisplay
 * Descrição: Formata e exibe de forma organizada os dados das variáveis de engenharia,
 *           relógio, alarmes ativos e modos operacionais nas 4 linhas do display LCD.
 */
void atualizarDisplay(float temp, float ur, float vpd, DateTime agora){
    float vpdMin, vpdMax;

    // Carrega os limites apenas para validação visual do status "OK" ou "ERROR"
    switch(faseAtual){
        case VEG: vpdMin = 0.4; vpdMax = 0.8; break;
        case FLOR: vpdMin = 0.8; vpdMax = 1.2; break;
        case FIN: vpdMin = 1.1; vpdMax = 1.6; break;
    }

    bool vpdOk = (vpd >= vpdMin && vpd <= vpdMax); // Condição booleana de validação

    // ---- LINHA 0: Temperatura e Umidade ----
    lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("T:"); lcd.print(temp, 1); lcd.print("C ");
    lcd.setCursor(9, 0); lcd.print("U:"); lcd.print(ur, 0); lcd.print("% ");

    // ---- LINHA 1: Exibição do VPD Calculado ----
    lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("VPD:"); lcd.print(vpd, 2); lcd.print("kPa ");

    // Impressão do horário (HH:MM)

```

```

lcd.setCursor(15, 0);
if(agora.hour() < 10) lcd.print("0");
lcd.print(agora.hour());
lcd.print(":");
if(agora.minute() < 10) lcd.print("0");
lcd.print(agora.minute());

// Impressão da data (DIA:MÊS)
lcd.setCursor(15, 1);
if(agora.day() < 10) lcd.print("0");
lcd.print(agora.day());
lcd.print("/");
if(agora.month() < 10) lcd.print("0");
lcd.print(agora.month());

// ---- LINHA 2: Gestão de Falhas e Diagnósticos Críticos ----
lcd.setCursor(0, 2);
if(sensorErro) {
  lcd.print("Sensor ERROR "); // Falha física no cabo ou leitura do SHT31
}
else if(reservatorioCheio){
  lcd.print("Reserv. CHEIO "); // Boia mecânica acionada
}
else if(erroLampada) {
  lcd.print("Luz FALHOU! "); // Falha detectada pelo LDR (Lâmpada queimada ou relé
quebrado)
}
else if(vpdOk) {
  lcd.print("Status: OK "); // Clima operacional estável
}
else {

```

```

    lcd.print("Status: ERROR "); // Clima fora dos limites estipulados
}

// ---- LINHA 3: Exibição de Fases e Indicadores de Modo ----
// Exibe no canto direito o indicador [M] para Manual (Usuário) ou [A] para Automático
(Calendário RTC)
lcd.setCursor(16, 3);
if(modManual) lcd.print("[M]");
else      lcd.print("[A]");

// Exibe o texto amigável correspondente ao ciclo atual
lcd.setCursor(0, 3);
switch(faseAtual){
    case VEG: lcd.print("Fase: VEGA  "); break;
    case FLOR: lcd.print("Fase: FLORA  "); break;
    case FIN: lcd.print("Fase: FINAL  "); break;
}
}

//
=====
=====

// 5. CONFIGURAÇÃO INICIAL DO SISTEMA (SETUP)
//
=====
=====

void setup(){
    Serial.begin(115200); // Inicializa a comunicação serial de alta velocidade

    // Configuração das diretrizes dos pinos dos atuadores como Saídas digitais
    pinMode(FAN1, OUTPUT);

```

```
pinMode(FAN2, OUTPUT);
pinMode(FAN3, OUTPUT);
pinMode(DESUM, OUTPUT);
pinMode(LAMP, OUTPUT);

// Configuração das entradas com resistores de Pull-Up internos ativados
pinMode(BTN_FASE, INPUT_PULLUP);
pinMode(BTN_RESERVATORIO, INPUT_PULLUP);

// Configuração do pino do LDR como entrada analógica pura
pinMode(PIN_LDR, INPUT);

Wire.begin(21, 22); // Inicializa o barramento I2C definindo os pinos SDA (21) e SCL (22) do
ESP32

rtc.begin(); // Inicializa o chip do RTC
//rtc.adjust(DateTime(F(__DATE__), F(__TIME__)));

sht31.begin(0x44); // Conecta ao sensor SHT31 usando o endereço I2C padrão 0x44

// Inicialização e Splash Screen do Display LCD
lcd.init();
lcd.backlight();
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Controlador Grow");
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("Inicializando...");
delay(2000); // Delay de 2 segundos exigido para estabilização de leitura dos sensores
lcd.clear(); // Limpa a tela para iniciar o loop de amostragem
}
```

```
//  
=====
```

```
=====
```

```
// 6. CICLO EXECUTÁVEL CONTÍNUO (LOOP PRINCIPAL)
```

```
//
```

```
=====
```

```
=====
```

```
void loop(){  
  // [1] Captura o carimbo de tempo atualizado do RTC  
  DateTime agora = rtc.now();  
  
  // [2] Processa as rotinas de entradas do usuário e varredura de calendário  
  lerBotaoFase();  
  
  atualizaFasePeloRTC(agora);  
  
  // [3] Lê o nível dinâmico do sensor de água com debounce por software  
  bool leituraReservatorio = digitalRead(BTN_RESERVATORIO);  
  
  if (leituraReservatorio != ultimoEstadoReservatorio) {  
    ultimoTempoReservatorio = millis();  
  }  
  
  if ((millis() - ultimoTempoReservatorio) > atrasoReservatorio) {  
    reservatorioCheio = (leituraReservatorio == LOW);  
  }  
  
  ultimoEstadoReservatorio = leituraReservatorio;  
  
  // [4] Processa as lógicas de acionamento do relé de iluminação  
  controleFotoperiodo(agora);
```

```

// [5] DIAGNÓSTICO EM MALHA FECHADA DA LÂMPADA (FEEDBACK VIA LDR)
int leituraLDR = analogRead(PIN_LDR); // Lê o valor analógico do LDR (0 a 4095)
bool comandoLampada = digitalRead(LAMP); // Verifica o estado lógico atualizado enviado ao
relé

// Lógica de avaliação de consistência física da iluminação
if (comandoLampada == LOW) {

// Relé acionado (lâmpada deveria estar ligada)

if (leituraLDR > 2000)
    erroLampada = true;
else
    erroLampada = false;
}
else {

// Lâmpada programada para ficar desligada

erroLampada = false; }

// [6] AQUISIÇÃO DE DADOS OPERACIONAIS DO SENSOR SHT31
float temp = sht31.readTemperature();
float ur = sht31.readHumidity();

// Cão de Guarda do Sensor: Avalia se os dados coletados são válidos ou corrompidos
if(isnan(temp) || isnan(ur) || temp < -10 || temp > 60 || ur < 0 || ur > 100) {
    sensorErro = true; // Ativa o sinalizador de pane do SHT31
} else {
    sensorErro = false; // Sensor operando dentro dos parâmetros de normalidade

```

```

}

// [7] PROCESSAMENTO MATEMÁTICO E CONTROLE CLIMÁTICO EM MALHA
FECHADA
float vpd = calcularVPD(temp, ur); // Calcula o valor instantâneo do VPD em kPa
controleAmbiente(temp, ur);      // Executa as lógicas de histerese e liga/desliga os atuadores
atualizarDisplay(temp, ur, vpd, agora); // Redesenha as informações na interface do Display
LCD

// [8] ENVIO DE DADOS FORMATADOS PARA DIAGNÓSTICO VISUAL EXTERNO
(SERIAL PLOTTER)
/*Serial.print(temp);    Serial.print(" ");
Serial.print(ur);       Serial.print(" ");
Serial.println(vpd);    Serial.print(" "); */

// SERIAL PLOTTER
// =====

//value1
Serial.print(temp);
Serial.print(" ");

//value2
Serial.print(ur);
Serial.print(" ");

//value3
Serial.print(vpd);
Serial.print(" ");

```

```
//value4
Serial.print(leituraLDR);
Serial.print(" ");

//value5
Serial.print(digitalRead(FAN1) * 100);
Serial.print(" ");

//value6
Serial.print(digitalRead(FAN2) * 100);
Serial.print(" ");

//value7
Serial.print(digitalRead(FAN3) * 100);
Serial.print(" ");

//value8
Serial.print(digitalRead(DESUM) * 100);
Serial.print(" ");

//value9
Serial.println(digitalRead(LAMP) * 100);

// [9] CADÊNCIA DO SISTEMA
// Retardo intencional mínimo para balanceamento térmico do chip e bom funcionamento do
debounce
delay(500);
}
```