

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA PORTO ALEGRE
CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

LUCAS BAUMGRATZ

ESTUFA AUTOMATIZADA IOT PARA CULTIVO
***INDOOR* DE MUDAS DE HORTALIÇAS**

PORTO ALEGRE
2025

Catálogo de Publicação na Fonte

B348e Baumgratz, Lucas.
Estufa automatizada IoT para cultivo *indoor* de mudas de hortaliças /
Lucas Baumgratz. – Porto Alegre, 2025.

78 f.

Prof. Dr. André Borin Soares.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade
Estadual do Rio Grande do Sul, Curso de Bacharelado em Engenharia
de Controle e Automação, Unidade em Porto Alegre, 2025.

1. Automação. 2. Germinação. 3. Hidroponia. 4. IoT. 5. MQTT. 6.
SCADA. 7. Microcontroladores. I. Soares, André Borin. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Carina Lima CRB10/1905

LUCAS BAUMGRATZ

**ESTUFA AUTOMATIZADA IOT PARA CULTIVO
INDOOR DE MUDAS DE HORTALIÇAS**

Monografia apresentada como requisito para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação, na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. André Borin Soares

**PORTO ALEGRE
2025**

LUCAS BAUMGRATZ

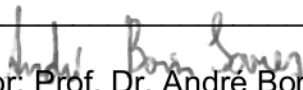
**ESTUFA AUTOMATIZADA IOT PARA CULTIVO
INDOOR DE MUDAS DE HORTALIÇAS**

Monografia apresentada como requisito para obtenção do grau de Engenheiro de Controle e Automação, na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. André Borin Soares

Aprovada em: 14/07/2025

BANCA EXAMINADORA


Orientador: Prof. Dr. André Borin Soares
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS


Prof. Dr. João Alvarez Peixoto
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

Prof. Me. Jean Schmith
Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, pelo apoio, paciência e pelos valores que me transmitiram, os quais foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Aos meus colegas de trabalho, que, com palavras de incentivo, ajuda prática e compreensão nos momentos mais intensos, contribuíram diretamente para a realização deste projeto. Aos professores do curso, pela dedicação ao ensino, pelo conhecimento compartilhado e por cada orientação que me ajudou a formar o profissional que sou hoje. Agradeço, em especial, ao Centro de Competência EMBRAPPII em Agricultura Digital, pelo ambiente de aprendizado, infraestrutura, incentivo à inovação e apoio técnico ao longo desta trajetória. A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada, o meu sincero muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma prova de conceito para uma câmara automatizada e sensorizada, voltada à germinação de sementes de hortaliças, como alface, em ambiente conduzido. O sistema foi projetado para monitorar e atuar sobre variáveis ambientais como temperatura e umidade do ar, umidade do substrato e intensidade luminosa, visando fornecer condições adequadas para o início do ciclo de cultivo. A arquitetura de *hardware* foi composta por sensores, atuadores e dois microcontroladores, um responsável pelo gerenciamento local e outro pela conectividade com a internet via protocolo MQTT. Uma interface de supervisão foi desenvolvida utilizando o software Eclipse E3, possibilitando o acionamento remoto dos dispositivos e o acompanhamento das leituras em tempo real. Testes experimentais validaram a funcionalidade do sistema, incluindo a confiabilidade da comunicação entre os módulos e a resposta dos atuadores aos comandos enviados. As sementes foram acompanhadas durante 15 dias, período em que foram registradas a ocorrência de germinação, o desenvolvimento inicial das plântulas e o comportamento das variáveis ambientais. Os resultados obtidos indicam que a solução proposta atendeu aos requisitos de funcionamento estabelecidos e pode ser utilizada como base para trabalhos futuros, especialmente no desenvolvimento de ambientes controlados automatizados voltados à germinação de plantas em pequena escala.

Palavras-chave: Automação, germinação, hidroponia, IoT, MQTT, SCADA, microcontroladores.

ABSTRACT

This project presents the development of a proof of concept for an automated and sensor-equipped chamber designed for the germination of vegetable seeds, such as lettuce, in a controlled environment. The system was designed to monitor and act upon environmental variables such as air temperature and humidity, substrate moisture, and light intensity, aiming to provide suitable conditions for the initial stage of the cultivation cycle. The hardware architecture consisted of sensors, actuators, and two microcontrollers, one responsible for local management and the other for internet connectivity via the MQTT protocol. A supervisory interface was developed using Elipse E3 software, allowing remote activation of devices and real-time monitoring of sensor readings. Experimental tests validated the functionality of the system, including the reliability of communication between modules and the response of actuators to issued commands. The seeds were monitored over a 15-day period, during which germination occurrence, initial seedling development, and the behavior of environmental variables were recorded. The results indicate that the proposed solution met the established operational requirements and can serve as a foundation for future work, especially in the development of small-scale automated controlled environments for plant germination.

Keywords: Automation, germination, hydroponics, IoT, MQTT, SCADA, microcontrollers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Esboço da automatização proposta	15
Figura 2 – Estágios morfológicos do	20
Figura 3 – Sistema hidropônico NFT	22
Figura 4 – Placa de desenvolvimento ESP32-C6.....	24
Figura 5 – Curva demonstrando linearidade do ADC do ESP32.....	24
Figura 6 – Placa de desenvolvimento <i>Blue pill</i>	25
Figura 7 – Arquitetura com o uso de SCADA.....	27
Figura 8 – Arquitetura de comunicação com MQTT	28
Figura 9 – Módulo para medição de iluminância BH1750	29
Figura 10 – Curva de eficiência fotossintética relativa.	30
Figura 11 – Lâmpada	32
Figura 12 – Sensor para umidade	33
Figura 13 – Sensor para.....	36
Figura 14 – Bomba peristáltica.....	37
Figura 15 – Prova de conceito e diagrama do experimento	39
Figura 16 - Fluxograma de desenvolvimento	44
Figura 17 – a) sensor de EC, b) sensor de PH,.....	46
Figura 18 – 3D da câmara projetada	50
Figura 19 – Diagrama simplificado da placa de gerenciamento	53
Figura 20 – Diagrama simplificado da placa de conectividade.....	53
Figura 21 – placa de gerenciamento e placa de conectividade integradas.	54
Figura 22 – Estrutura de arquivos do <i>firmware</i>	55
Figura 23 – Tela principal desenvolvida no Eclipse Studio E3.....	58
Figura 24 – Fluxo desenvolvido no Node-RED.	59
Figura 25 – Diagrama do fluxo de dados da solução de contorno.	59
Figura 26 – Estufa automatizada confeccionada.....	60
Figura 27 – Fluxograma de funcionamento.....	61
Figura 28 – Calibração da irrigação.	63
Figura 29 – Diagrama conceitual simplificado.....	64
Figura 30 – MQTT Cliente para validação.....	64
Figura 31 – Fluxo Node-RED ativo e debugando.....	65

Figura 32 – Driver de comunicação do E3 validado.	65
Figura 33 – Atuadores e sensores em operação.....	66
Figura 34 – Tela do Elipse E3 em operação.	67
Figura 35 – Comparativo do desenvolvimento das plantas.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados do desenvolvimento das plântulas	72
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Instrumentos adquiridos para o projeto	51
Quadro 2 – Relação dos registradores <i>modbus</i>	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 PROBLEMÁTICA	14
1.2 HIPÓTESE	15
1.3 OBJETIVOS	16
1.4 RESULTADOS ESPERADOS.....	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1.1 Germinação: fatores que influenciam o desenvolvimento inicial das mudas	19
2.1.2 Hidroponia: conceito e aplicações	21
2.1.3 Microcontroladores	23
2.1.3 Sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA)	25
2.1.4 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)	27
2.1.5 Sensor de iluminância	28
2.1.6 Lampada <i>full spectrum</i>	31
2.1.7 Sensor de umidade e temperatura	33
2.1.8 Sensor de umidade do solo	34
2.1.9 Bomba peristáltica	36
2.2 PESQUISAS RELACIONADAS	37
2.2.1 Development of an IoT-Based Precision Irrigation System for Tomato Production from Indoor Seedling Germination to Outdoor Field Production	37
2.2.2 Sistema de controle de temperatura e umidade para germinação de sementes	40
3 METODOLOGIA	42
3.1 TIPO DE PESQUISA	42
3.2 UNIVERSO DE ABRANGÊNCIA DA PESQUISA	42
3.3 MÉTODO APLICADO	43
3.4 INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	45
3.5 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE RESULTADOS	46
3.6 PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	47

4 RESULTADOS	49
4.1 IMPLEMENTAÇÃO DA PROVA DE CONCEITO	49
4.1.1 Projeto mecânico	49
4.1.2 Instrumentação	51
4.1.3 Projeto de <i>hardware</i>	51
4.1.4 Projeto de <i>firmware</i>	54
4.1.5 Desenvolvimento da interface	57
4.1.6 Confeccção da estufa automatizada	59
4.2 FLUXO DE FUNCIONAMENTO.....	60
4.3 TESTES EXPERIMENTAIS REALIZADOS.....	61
4.3.1 Avaliação da vazão da bomba peristáltica.....	62
4.3.2 Validação da comunicação entre os módulos e da arquitetura	63
4.3.3 Validação do funcionamento geral do sistema	66
5 ANÁLISE	69
5.1 ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA	69
5.1.1 Análise dos resultados da automatização	69
5.1.2 Análise dos resultados do desenvolvimento das mudas	71
5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE MELHORIAS FUTURAS	72
6 CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura, a disponibilidade global de água doce por pessoa diminuiu em mais de 20% nas últimas duas décadas (FAO, 2020), ao mesmo tempo em que cerca de 14% dos alimentos produzidos no mundo são perdidos antes mesmo de chegarem ao varejo (FAO, 2022). Esses dados evidenciam a necessidade de que os sistemas agrícolas tradicionais melhorem sua eficiência diante de desafios como a escassez de recursos naturais, as ineficiências logísticas, as mudanças climáticas e o adensamento urbano. Nesse contexto, torna-se essencial a adoção de novas técnicas de cultivo e o desenvolvimento de soluções produtivas mais sustentáveis e tecnologicamente adaptadas às demandas dos ambientes urbanos.

A hidroponia, definida como o cultivo de plantas sem solo com raízes imersas em solução nutritiva balanceada (LABHIDRO, 2012), é uma alternativa viável e sustentável para o cultivo de hortaliças, especialmente em regiões espaço físico limitado. Estudos como o de Sharma *et al.* (2018) demonstram que sistemas hidropônicos baseados na técnica Nutrient Film Technique (NFT) podem reduzir em até 90% o consumo de água em comparação ao cultivo convencional em solo.

Como apontam Ferreira e Borghetti (2004), luz, temperatura e umidade estão entre os principais fatores que interferem no crescimento das plântulas, sendo essenciais para a emergência e vigor inicial das mudas. Por isso, a fase de germinação e o desenvolvimento inicial das mudas permanecem etapas críticas do cultivo, fortemente influenciadas por variáveis ambientais como temperatura, umidade relativa do ar, disponibilidade hídrica e intensidade luminosa.

No estado do Rio Grande do Sul, por exemplo, a ocorrência de semanas com baixa incidência de radiação solar durante o inverno reduz significativamente a disponibilidade energética para o desenvolvimento vegetal e encurta o fotoperíodo. De acordo com Bergamaschi e Bergonci (2017), a radiação solar recebida nessa estação é consideravelmente menor do que no verão, caracterizando os fotoperíodos mínimos e máximos típicos da região. Essa condição sazonal impõe limitações importantes à eficácia de estufas passivas e ambientes naturais durante a germinação de mudas, especialmente para espécies sensíveis à variação luminosa e térmica.

Diante desse contexto, torna-se desejável o desenvolvimento de sistemas de

germinação que operem em ambientes conduzidos, capazes de monitorar e controlar variáveis ambientais por meio de sensores e atuadores. A automatização desse processo visa assegurar maior previsibilidade e eficiência na produção de mudas, reduzindo a influência de fatores externos e ampliando as possibilidades para a agricultura urbana e tecnificada.

1.1 PROBLEMÁTICA

“Luz, temperatura e umidade estão entre os principais fatores que interferem no crescimento das plântulas” (Ferreira; Borghetti, 2004, p. 239). Quando esses elementos não se mantêm dentro de faixas adequadas, como ocorre em situações de baixa luminosidade, variações bruscas de temperatura ou baixos níveis de umidade relativa do ar, o processo de germinação e o desenvolvimento inicial das mudas podem ser comprometidos. Ambientes naturais ou estufas passivas, por dependerem diretamente das condições climáticas externas, nem sempre conseguem oferecer a estabilidade necessária, especialmente durante o inverno em regiões de menor radiação solar.

Outro ponto relevante, está na distância entre os centros produtores e os grandes centros consumidores, o que representa um desafio logístico para a produção e distribuição de alimentos. Esse trajeto prolongado pode resultar em perdas durante o transporte, aumento dos custos operacionais e redução da qualidade dos produtos até o ponto de consumo. Nesse contexto, aproximar os sistemas produtivos dos centros urbanos surge como uma alternativa viável para reduzir perdas e tornar a cadeia de abastecimento mais eficiente.

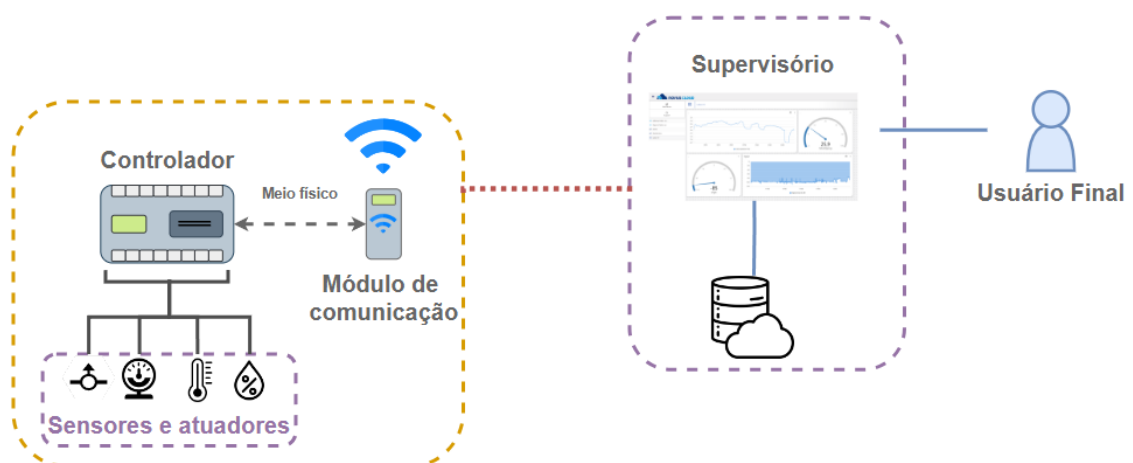
Ainda, um dos principais desafios na fase de germinação e produção de mudas é manter os parâmetros ambientais dentro de faixas estáveis e ideais ao longo de todo o processo. Mesmo em ambientes internos, variações naturais de temperatura, umidade e luminosidade podem comprometer a uniformidade e o vigor das mudas. A presença de sistemas integrados capazes de monitorar e ajustar automaticamente essas variáveis possibilita evitar o comprometimento do desenvolvimento das plântulas em soluções domésticas ou experimentais.

1.2 HIPÓTESE

A proposta de uma estufa automatizada IoT (*Internet of Things*), instalada em uma estrutura fechada, visa atender as necessidades descritas na seção 1.1 PROBLEMÁTICA. Ao permitir o monitoramento de temperatura, umidade, luz e irrigação em um espaço protegido, além do comando de irrigação, resfriamento e intensidade de luz via interface, essa solução pode somar na autonomia produtiva, aumentando a padronização e a qualidade das mudas, além de viabilizar a produção local e contínua, mesmo em regiões urbanas ou de clima desfavorável.

Essa estrutura proposta, permite o monitoramento, parametrização e comandos remotos por meio de uma plataforma com sistema supervisório acessada pelo usuário final. O sistema embarcado realiza a aquisição dos dados por sensores, aciona os atuadores de forma autônoma ou comandada e envia as informações a um módulo de comunicação que, por sua vez, alimenta a interface gráfica via rede sem fio. Dessa forma, busca-se viabilizar a produção padronizada de mudas em ambiente urbano, garantindo maior estabilidade das condições ambientais durante a fase de germinação, mesmo em locais com limitações climáticas ou estruturais para o cultivo convencional. A Figura 1 mostra um esboço da aplicação proposta.

Figura 1 - Esboço da automatização proposta



Fonte: Autor (2025)

1.3 OBJETIVOS

Esta seção apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos que norteiam o desenvolvimento do trabalho proposto. Os objetivos foram definidos com base na problemática identificada e orientam as etapas da pesquisa, desde a concepção da solução até sua implementação. A delimitação clara dos objetivos também contribui para avaliar a viabilidade técnica e os resultados alcançados ao final do projeto.

1.3.1 Objetivo geral

Criar uma alternativa para a etapa inicial da produção de hortaliças sob demanda, individual e urbanizada, por meio do desenvolvimento de uma estufa automatizada *indoor*, capaz de formar um microambiente semicontrolado para a germinação e o desenvolvimento inicial de mudas. A solução propõe o monitoramento e o ajuste remoto de variáveis ambientais essenciais como temperatura, umidade, luminosidade e irrigação, de modo a viabilizar uma produção local, padronizada e independente das condições climáticas externas.

1.3.2 Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo geral, alguns objetivos específicos serão requeridos, entre eles:

- a) realizar um levantamento técnico sobre as condições ideais para a germinação e desenvolvimento inicial de mudas de hortaliças, com foco nas variáveis ambientais críticas;
- b) projetar uma estrutura física de estufa indoor, utilizando material como acrílico, dimensionada para acomodar as mudas e os elementos de automação;
- c) selecionar sensores adequados para monitoramento de temperatura, umidade do ar, luminosidade e presença de água no substrato;
- d) implementar o sistema embarcado responsável pela aquisição dos dados dos sensores e comando dos atuadores (irrigação, iluminação artificial e

- ventilação), com programação em linguagem de baixo nível;
- e) integrar com o sistema embarcado um módulo de conectividade capaz de permitir a comunicação sem fio;
 - f) integrar uma interface supervisória acessível remotamente via rede sem fio, permitindo a visualização em tempo real das variáveis monitoradas e o envio de comandos ao sistema;
 - g) desenvolver uma interface web embarcada, permitindo a parametrização do sistema e o acompanhamento remoto das medições;
 - h) avaliar o funcionamento do sistema em ambiente experimental, simulando condições críticas (ausência de luz, variações de umidade e temperatura) para testar a capacidade da estufa em manter as variáveis dentro dos parâmetros desejados;
 - i) documentar e analisar os resultados obtidos, destacando o potencial da solução para aplicações em agricultura urbana, produção doméstica e cenários com baixa disponibilidade de mão de obra especializada.

1.4 RESULTADOS ESPERADOS

A proposta de uma estufa automatizada indoor para a germinação de mudas de hortaliças visa proporcionar um ambiente *indoor* protegido que reduza a dependência de condições climáticas externas e de mão de obra qualificada.

Espera-se que, com o gerenciamento automatizado de variáveis como temperatura, umidade, luminosidade e irrigação, a solução contribua para a padronização do processo de germinação e aumente a eficiência na produção de mudas em ambientes urbanos.

O sistema proposto visa tornar o cultivo mais acessível a usuários com pouco conhecimento técnico, ao permitir o acompanhamento e o controle do ambiente por meio de uma interface, como supervisório. Dessa forma, o projeto pretende contribuir com soluções práticas para a descentralização da produção de alimentos, além de incentivar a automação em pequenas escalas.

Os resultados esperados que se deseja obter com este trabalho são:

- a) obtenção de um sistema funcional capaz de controlar e monitorar

automaticamente as condições ambientais de uma estufa indoor para germinação de mudas;

- b) demonstração do funcionamento da estufa com iluminação artificial e ajuste de irrigação, mesmo em situações sem radiação solar externa;
- c) registro e acompanhamento das variáveis ambientais em tempo real por meio da interface supervisória;
- d) prova de conceito da viabilidade de utilizar automação embarcada e comunicação sem fio em sistemas de cultivo urbano;
- e) redução da necessidade de intervenção manual no processo de germinação, tornando o sistema acessível para uso doméstico ou em pequenas produções urbanas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção apresenta o referencial teórico para desenvolvimento do projeto de pesquisa, demonstrando conceitos, métodos e tecnologias que serão utilizadas como referência para o desenvolvimento do projeto.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para embasar o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma revisão de literatura envolvendo livros, artigos científicos e trabalhos técnicos relacionados às tecnologias abordadas na proposta. O objetivo é reunir informações sobre as tecnologias utilizadas e explorar os conceitos de modo a fundamentar a proposta apresentada frente aos desafios do desenvolvimento.

2.1.1 Germinação: fatores que influenciam o desenvolvimento inicial das mudas

A germinação é a fase inaugural do ciclo de vida das plantas superiores, marcada pela reativação do metabolismo do embrião contido na semente, geralmente induzida pela absorção de água, processo conhecido como imbibição. Essa fase culmina com a protrusão¹ da radícula², indicando o início do crescimento ativo da plântula³ (Ferreira; Borghetti, 2004). A água desempenha papel central nesse processo, sendo responsável pela ativação de vias metabólicas, reparo celular e mobilização de reservas. A

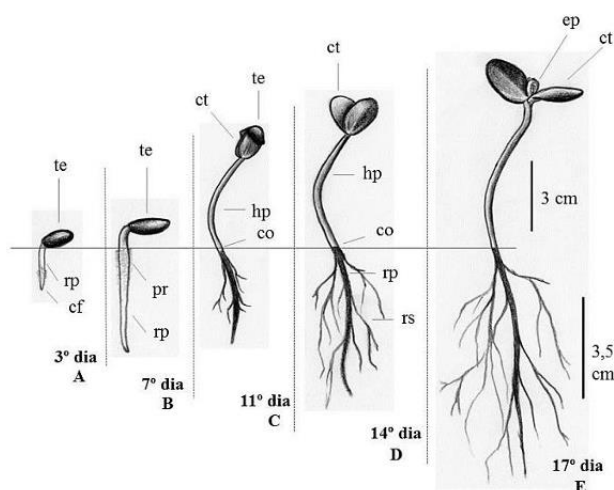
Figura 2 mostra os estágios iniciais do desenvolvimento de uma planta superior, iniciando-se com a semente contendo o embrião, seguida pela emissão da radícula e evolução até a formação da plântula.

¹ Processo em que a radícula rompe o tegumento da semente, marcando o início visível da germinação.

² Primeira estrutura a emergir durante a germinação, que dará origem ao sistema radicular da planta.

³ Estrutura jovem resultante da germinação da semente, composta pelas primeiras partes da futura planta, como radícula, hipocótilo e folhas iniciais

Figura 2 – Estágios morfológicos do desenvolvimento inicial da planta



Fonte: Medeiros *et al.* (2019).

Como já mencionado, o sucesso da germinação depende de fatores como temperatura, oxigênio, disponibilidade hídrica e, em alguns casos, luz. No caso da alface (*Lactuca sativa*), a luz exerce influência significativa sobre a germinação, atuando como fator fotoblástico⁴ positivo. Estudos clássicos demonstraram que a luz vermelha (cerca de 660 nm) estimula o processo germinativo, enquanto a luz vermelho-extremo (cerca de 730 nm) o inibe, evidenciando o papel dos fitocromos⁵ (Ferreira; Borghetti, 2004).

Em ambientes controlados, como estufas *indoor*, a qualidade da luz artificial é crucial. A utilização de LEDs (*Light Emitting Diode*) com espectros azul e vermelho tem se mostrado eficiente na promoção da germinação e crescimento inicial de mudas, devido à maior absorção pela clorofila nessas faixas de comprimento de onda (Lin *et al.*, 2013). A intensidade luminosa e o fotoperíodo também exercem efeitos fisiológicos diretos. Guimarães e Tavares (2023) observaram que a exposição de mudas de alface a 6 horas diárias de luz artificial resultou em maior taxa de germinação (99%), superando os grupos com 0 e 12 horas.

Em sistemas de cultivo sem solo, como a hidroponia, onde a solução nutritiva é a única fonte de água e nutrientes, o controle da condutividade elétrica (EC) da

⁴ Termo usado para descrever sementes cuja germinação é influenciada pela presença ou ausência de luz.

⁵ Pigmento vegetal sensível à luz vermelha e ao vermelho distante, que regula processos fisiológicos como germinação, floração e estiolamento.

solução nutritiva durante a germinação é igualmente essencial para evitar estresse osmótico nas plântulas. Conforme recomendações técnicas da Green Power (2020), a faixa ideal de EC para a fase de germinação varia entre 0,8 e 1,3 mS/cm, proporcionando equilíbrio entre disponibilidade de nutrientes e segurança osmótica.

O substrato exerce papel relevante na uniformidade da emergência. A espuma fenólica, amplamente utilizada em sistemas hidropônicos, oferece boa retenção de umidade, aeração adequada e suporte mecânico às sementes. Durante os primeiros dias, a irrigação com solução diluída (cerca de 0,5 mS/cm) e controle do pH (Potencial Hidrogeniônico) entre 5,5 e 6,0 favorecem a absorção de nutrientes essenciais como N, P, K, Ca e Mg (Ferreira; Borghetti, 2004).

Outro fator decisivo para a germinação eficiente de sementes é a temperatura. Para alface, a faixa ótima situa-se em torno de 20 °C, enquanto temperaturas superiores a 30 °C podem provocar termoinibição, um bloqueio fisiológico temporário que impede a germinação mesmo na presença de água (Nascimento; Cantliffe, 2002). Tal condição compromete o estande inicial e, por consequência, a produtividade do sistema.

O controle automatizado de variáveis ambientais (luz, temperatura, umidade, pH e EC) possibilita maior previsibilidade e replicabilidade no processo germinativo, especialmente em contextos urbanos ou com restrições climáticas.

Conforme argumentam Ferreira e Borghetti (2004), a semente, ao retomar seu metabolismo após a dessecação natural, responde de forma sensível aos estímulos externos. Em sistemas com monitoramento automatizado, essa sensibilidade pode ser explorada em benefício de um desenvolvimento mais vigoroso e uniforme das mudas.

Neste trabalho, o conhecimento sobre os processos de germinação e as etapas iniciais do desenvolvimento das plantas é fundamental para adequar o projeto da automação, assim como para a definição de uma prova de conceito coerente com as exigências fisiológicas do cultivo.

2.1.2 Hidroponia: conceito e aplicações

A palavra hidroponia vem do grego, dos radicais *hydro* (água) e *ponos* (trabalho). Apesar de ser uma técnica relativamente antiga, o termo hidroponia só foi

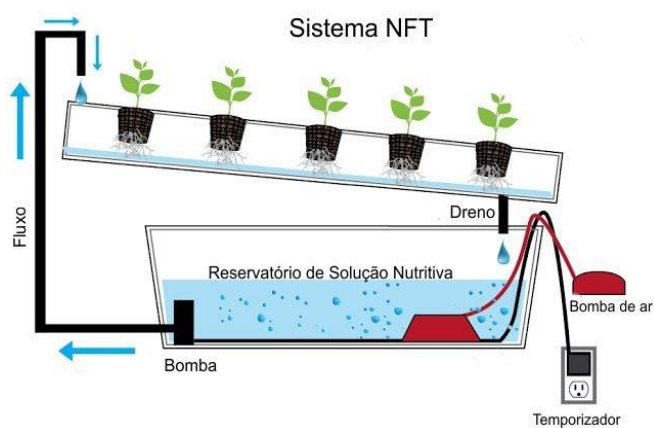
utilizado pela primeira vez em 1935 pelo Dr. W. F. Gericke da Universidade da Califórnia (LabHidro, 2012).

Para garantir um crescimento satisfatório, todas as plantas superiores ou verdes, requerem certas condições essenciais: água, luz, sais minerais, ar e sustentação para as raízes (Douglas, 2003). Sendo assim, não necessariamente depende-se da terra para o crescimento saudável de uma planta.

A hidroponia é a técnica de cultivar plantas sem solo, onde os elementos minerais essenciais para o crescimento e o desenvolvimento das plantas são fornecidos através de uma solução nutritiva que fornece na medida exata e de forma constante todos os nutrientes que os vegetais necessitam.

Existem vários sistemas hidropônicos. Eles diferem entre si pela forma em que a solução nutritiva entra em contato com as raízes. Basicamente, para um conjunto hidropônico é necessária uma estrutura para sustentação da planta, um reservatório para solução nutritiva, um meio de contato entre as raízes e a solução nutritiva. O sistema NFT é o principal sistema presente no mercado. O *Nutrient Film Technique* utiliza um fluxo constante de sua solução nutritiva de tecnologia de crescimento. A solução é bombeada de um reservatório para um tubo de cultivo que terá que ser. O tubo não requer nenhum meio de crescimento. As raízes absorvem os nutrientes da solução nutritiva cujo fluxo descendente retorna ao reservatório para ser reciclado novamente. A bomba e a manutenção elétrica são essenciais para evitar falhas no sistema, onde as raízes podem secar rapidamente quando o fluxo é interrompido. A Figura 3 ilustra como um sistema NFT é disposto.

Figura 3 – Sistema hidropônico NFT



Fonte: Tropical Estufas (2025).

Neste trabalho será monitorado e conduzido o processo de germinação até a fase de mudas, que antecede a etapa em que elas serão colocadas em sistemas hidropônicos. As técnicas de controle de PH e EC, e automatização do sistema de irrigação servirão como base para a estufa de germinação.

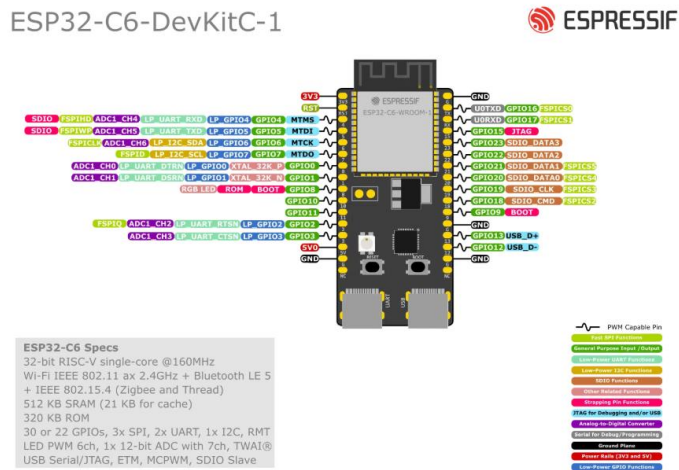
2.1.3 Microcontroladores

Os microcontroladores desempenham papel central em sistemas automatizados, atuando na leitura de sensores, comando de atuadores e possibilitando comunicação com outros dispositivos ou com a internet. Entre as diversas opções disponíveis, foi abordado neste trabalho duas famílias de microcontroladores em suas versões de desenvolvimento: o ESP32-C6 e a Blue Pill STM32F103C8T6.

O ESP32-C6, é fabricado pela Espressif e é voltado para aplicações de Internet das Coisas (IoT). Segundo o portal Embarcados (2025), a placa oferece suporte a tecnologias de comunicação sem fio como Wi-Fi, Bluetooth LE, Zigbee e Thread, além de operar com baixo consumo de energia. Isso a torna uma escolha ideal para aplicações em automação industrial, Internet das Coisas (IoT), área da saúde, entre outras. O artigo destaca também que o ESP32-C6 permite o desenvolvimento com Espressif IDF, mas é compatível com ambientes como PlatformIO e Arduino IDE, o que o torna acessível para diferentes perfis de desenvolvedores.

A Figura 4 apresenta a placa de desenvolvimento, bem como as possíveis funcionalidade de suas portas lógicas.

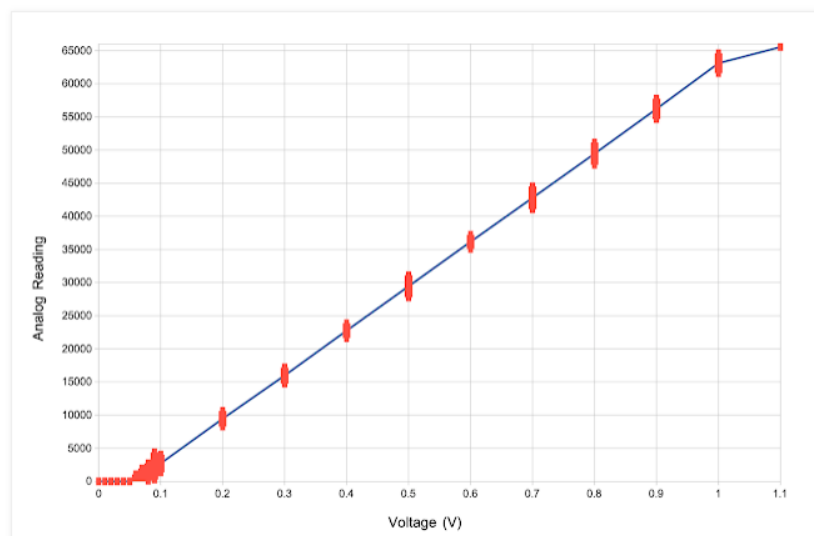
Figura 4 – Placa de desenvolvimento ESP32-C6



Fonte: Embarcados (2025).

Um comparativo feito por Dr. Monk (2024) entre os conversores analógico-digitais (ADC) de três plataformas — ESP32, Raspberry Pi Pico e Arduino Uno — mostrou que o ADC do ESP32 apresentou os piores resultados entre os três, com zonas mortas nas extremidades da escala de leitura e grande dispersão nos valores convertidos. O autor aponta que, embora a plataforma seja excelente para aplicações conectadas, seu ADC pode não ser ideal para medições precisas de sinais analógicos, sugerindo a adoção de ADCs externos em casos mais críticos. A Figura 5 mostra os resultados dos testes realizados no artigo.

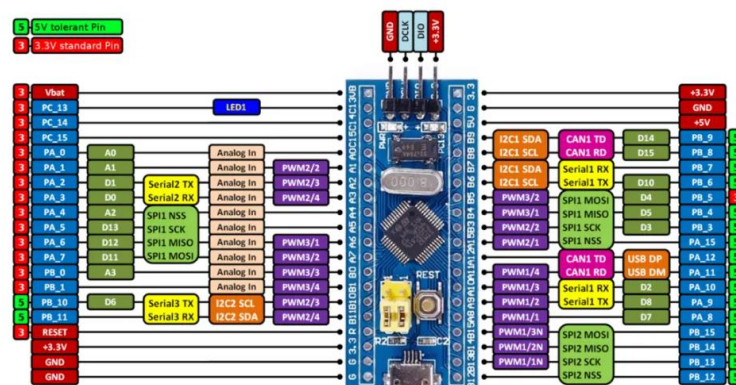
Figura 5 – Curva demonstrando linearidade do ADC do ESP32



Fonte: Doctormonk (2024).

Pensando na necessidade de integração com sensores que utilizam saídas analógicas e na possibilidade de trabalhar com um *framework* mais confiável, com suporte à geração de código por interface gráfica, foi selecionado para avaliação o microcontrolador Blue Pill STM32F103C8T6. Baseado no núcleo ARM Cortex-M3, o dispositivo é reconhecido por sua eficiência, baixo custo e flexibilidade, sendo amplamente utilizado em aplicações embarcadas que exigem controle mais direto sobre o *hardware*. De acordo com o artigo do Embarcados (2020), a placa oferece recursos como ADC de 12 bits, timers, PWM, comunicação serial e suporte à depuração via SWD. O texto também destaca que, embora possua uma curva de aprendizado mais elevada em comparação ao Arduino, a Blue Pill se integra de forma eficiente com ferramentas como o STM32CubeMX e a biblioteca HAL (*Hardware Abstraction Layer*), o que permite configurar e programar os periféricos de maneira estruturada. A Figura 6 apresenta a placa de desenvolvimento, bem como as possíveis funcionalidade de suas portas lógicas.

Figura 6 – Placa de desenvolvimento *Blue pill*



Fonte: Embarcados (2020).

Para este trabalho, foi escolhido o Esp32 para servir como módulo IoT de comunicação sem fio, enquanto o STM32F103C8T6 será o microcontrolador de gerenciamento, adquirindo a resposta dos sensores e comandando os atuadores.

2.1.3 Sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA)

O SCADA (*Supervisory control and data acquisition*) é um sistema utilizado

para monitorar, controlar e visualizar processos em tempo real, sendo aplicado em setores como energia, saneamento, manufatura. Seu principal objetivo é permitir que operadores acompanhem o estado de um processo por meio de uma interface gráfica, facilitando decisões e intervenções humanas baseadas em dados confiáveis.

Segundo a RT Engineering (2023), um SCADA moderno é mais do que um sistema de controle: ele é uma ferramenta de supervisão com foco em visualização de dados, combinando painéis gráficos personalizáveis, registro histórico, e acesso remoto, frequentemente via *browser* ou aplicação dedicada. Essa visualização gráfica facilita o diagnóstico de falhas, a análise de tendências e a tomada de decisões baseadas em informações visuais e atualizadas constantemente.

Na prática, um SCADA integra três componentes principais:

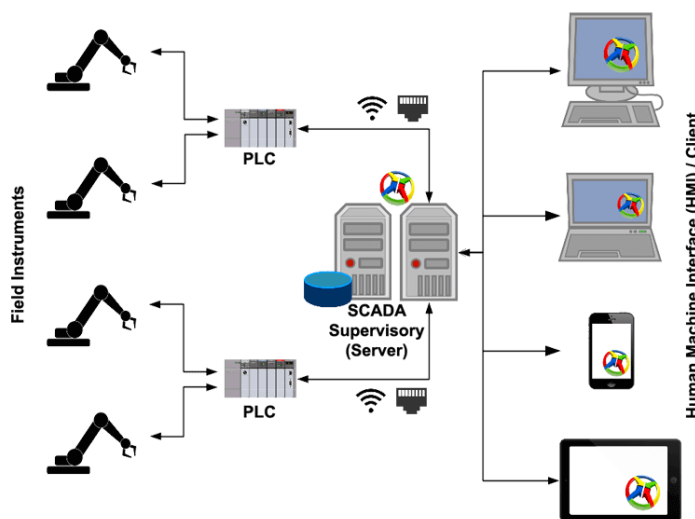
- a) aquisição de dados: sensores e dispositivos em campo capturam variáveis do processo (como temperatura, umidade, pH ou condutividade elétrica);
- b) controle supervisionado: controladores (como controladores dedicados ou CLPs) recebem esses dados de interesse, como receitas, *setpoints* ou comandos, processam as informações e, quando necessário, executam comandos;
- c) interface humano-máquina (HMI): os dados coletados são apresentados ao usuário em forma de gráficos, botões, indicadores e alarmes em tempo real, permitindo monitoramento visual e interação com o sistema.

A aplicação de sistemas SCADA na agricultura tem sido investigada em projetos europeus como o PANTHEON, que demonstrou a viabilidade dessa abordagem para o monitoramento e gerenciamento de plantações de avelã por meio de veículos autônomos terrestres e aéreos, sensores ambientais e uma interface supervisória centralizada (PANTHEON, 2021). Logo, o uso de SCADA como interface para aplicações como a de uma estufa automatizada para cultivo de mudas, que pode mostrar ao usuário as variáveis ambientais internas (temperatura, umidade, luz, EC, pH) em tempo real, permitindo ajustes na operação, configuração de limites para alarmes e geração de relatórios, se mostra possível e compatível com a proposta. Além disso, com a integração de comunicação via Wi-Fi, protocolos como MQTT ou Modbus TCP/IP podem ser usados para transmitir dados entre o microcontrolador e a interface gráfica hospedada localmente ou na nuvem.

Assim, o SCADA atua como um elo essencial entre o ambiente físico controlado

e o operador, oferecendo transparência, controle e rastreabilidade das variáveis de processo. A Figura 7 ilustra a arquitetura que contempla o sistema de supervisão em um ambiente industrial.

Figura 7 – Arquitetura com o uso de SCADA



Fonte: Integraxor (2025).

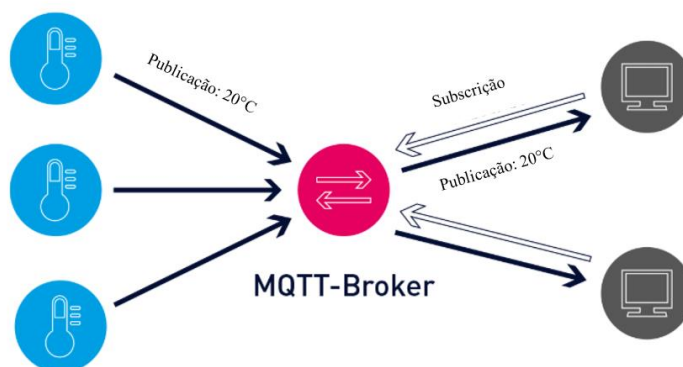
2.1.4 Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)

O protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) foi desenvolvido originalmente em 1999 por Andy Stanford-Clark, da IBM, e Arlen Nipper, da empresa Arcom (atualmente Cirrus Link), com o objetivo de fornecer uma solução leve e eficiente para comunicação entre dispositivos remotos em ambientes com restrições severas de largura de banda, como redes via satélite (Stanford-Cark; Sipper, 2018). A proposta visava atender aplicações industriais distribuídas, como o monitoramento de oleodutos e gasodutos. Desde então, o protocolo evoluiu e passou a ser amplamente utilizado em sistemas embarcados e aplicações de Internet das Coisas (IoT). Atualmente, o MQTT é padronizado pela OASIS (*Organization for the Advancement of Structured Information Standards*), que mantém a versão oficial do protocolo e suas atualizações (OASIS, 2019).

O MQTT é um protocolo de mensagens leve, orientado a eventos, projetado para comunicação máquina-a-máquina (M2M) e aplicações IoT. Ele opera segundo o modelo publicador/assinante (*publish/subscribe*), com intermediação feita por um

servidor denominado *broker*. Essa estrutura permite uma comunicação assíncrona, eficiente e descentralizada entre dispositivos distribuídos. A Figura 8 mostra a arquitetura de comunicação com o uso de MQTT.

Figura 8 – Arquitetura de comunicação com MQTT



Fonte: Adaptado de Paessler AG (2025).

De acordo com a especificação oficial da versão 5.0 publicada pela OASIS (2019), o MQTT é projetado para ser “uma solução eficiente para redes de baixa largura de banda, alta latência ou conexões instáveis” (OASIS, 2019). Essas características o tornam especialmente adequado para sistemas embarcados e aplicações em ambientes com restrições de energia e processamento, monitoramento remoto e redes de sensores.

No protocolo MQTT, os dispositivos publicam mensagens em tópicos específicos e outros dispositivos se inscrevem nesses tópicos para receber atualizações. O *broker* é responsável por receber, armazenar temporariamente e redirecionar as mensagens para todos os assinantes interessados. Essa separação lógica entre publicadores e assinantes reduz o acoplamento entre os componentes do sistema e facilita a escalabilidade.

Neste projeto o protocolo MQTT poderá ser útil para servir como meio de integrar o módulo de comunicação e o sistema de supervisão SCADA.

2.1.5 Sensor de iluminância

O BH1750FVI é um sensor digital de intensidade luminosa desenvolvido pela Rohm Semiconductor (Rohm Semiconductor, 2011), capaz de medir iluminância em

lux com boa resolução e simplicidade de integração. Utiliza um fotodiodo integrado com conversor analógico-digital de 16 bits, fornecendo leitura direta e precisa da luz incidente sem necessidade de cálculos adicionais. Um dos principais diferenciais do BH1750 é sua capacidade de medição com resolução de 1 lux e alcance de até 65.535 lux, tornando-o apropriado tanto para ambientes internos com baixa luminosidade quanto para aplicações sob luz solar direta. Sua comunicação digital via barramento I²C simplifica a integração com microcontroladores, como o STM32F103C8T6, permitindo a leitura. A Figura 9 mostra o módulo com circuito integrado.

Figura 9 – Módulo para medição de iluminância BH1750



Fonte: NN Digital (2019).

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a iluminância é expressa em lux (lx), definido como o fluxo luminoso de 1 lúmen por metro quadrado (BIPM, 2019). A realização prática do lux envolve medições com fontes de intensidade luminosa conhecida, e pode ser determinada pela equação (1).

$$E_v = I_v \cdot \frac{\Omega}{r^2} \quad (1)$$

onde E_v é iluminância (lx), I_v é a intensidade luminosa (cd), Ω é o ângulo sólido (sr), r é a distância entre a fonte e ponto de medição (m). Alternativamente, a iluminância pode ser por métodos radiométricos baseados em fontes de corpo negro ou radiômetros absolutos (BIPM, 2021).

O lúmen (lm), por sua vez, é uma unidade fotométrica que representa o fluxo luminoso visível ponderado pela sensibilidade do olho humano, de acordo com a curva de eficiência espectral $V(\lambda)$. Essa curva descreve a resposta relativa da visão humana aos diferentes comprimentos de onda da luz visível, atingindo seu pico em 555 nm, na

região do verde (Blpm, 2021). Isso implica que fótons verdes contribuem mais significativamente para o valor em lúmens do que fótons azuis (~450 nm) ou vermelhos (~660 nm), mesmo que todos possuam a mesma energia física.

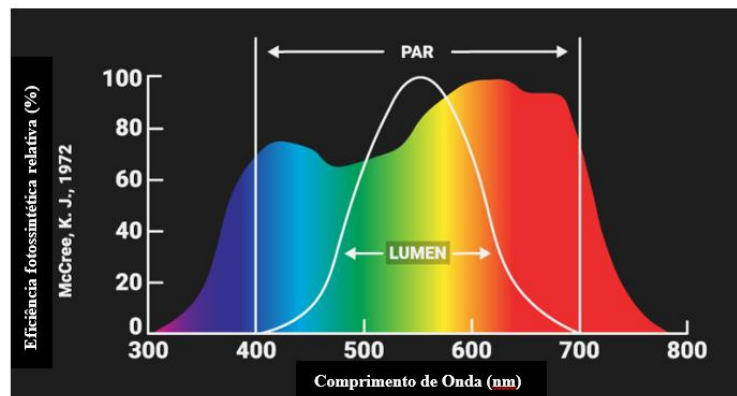
Fisicamente, a luz é composta por fótons, e a energia de cada fóton depende do seu comprimento de onda, conforme expressa a equação (2) de Planck.

$$E = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

onde E é a energia do fóton em joules, h é a constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J·s), c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s) e λ o comprimento de onda em metros.

Para as plantas, o que realmente importa é a quantidade de fótons úteis na faixa de 400 a 700 nm, conhecida como radiação fotossinteticamente ativa (PAR – *Photosynthetically Active Radiation*). Essa faixa é confirmada no estudo realizado por Lin *et al.* (2013), que analisou o impacto da luz azul, vermelha e branca no desenvolvimento de alfaces cultivadas com hidroponia. A Figura 10 mostra comparação entre a curva de eficiência fotossintética relativa (PAR) e a sensibilidade visual humana (lúmen) em função do comprimento de onda.

Figura 10 – Curva de eficiência fotossintética relativa.



Fonte: Adaptado de: McCree (1972), *apud* Jungle Leaves (2024).

Esse princípio também se aplica às fases iniciais do ciclo da planta, como a germinação, nas quais a luz vermelha (aproximadamente 660 nm) atua como estímulo ao processo germinativo, enquanto a luz vermelho-extremo (aproximadamente 730 nm) exerce efeito inibitório, conforme já citado Ferreira e Borghetti (2004).

A grandeza mais relevante nesse contexto é o PPF (Photosynthetic Photon Flux Density), medido em $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, que representa o fluxo de fótons fotossinteticamente ativos por segundo por metro quadrado.

A unidade lux, por sua vez, é ponderada pela sensibilidade do olho humano, o que significa que privilegia comprimentos de onda entre aproximadamente 500 e 600 nm, enquanto as plantas respondem mais intensamente a comprimentos de onda no vermelho (~660 nm) e azul (~450 nm).

Embora o BH1750 forneça medições de iluminância em lux, unidade derivada da percepção humana de brilho, esse parâmetro não reflete diretamente a luz disponível para a fotossíntese. Dessa forma, o valor em lux fornecido pelo BH1750 deve ser interpretado com cautela em aplicações agrícolas, pois não fornece uma medida direta da quantidade de luz fotossintética disponível, porém pode ser útil como indicador geral de variação de luz em ambientes fechados.

A correlação entre lux e PPF não é direta nem fixa, pois depende do espectro da fonte luminosa. Portanto, o BH1750 é adequado para monitoramento relativo da iluminação e controle de presença ou ausência de luz, mas sistemas que demandam controle preciso do crescimento fotossintético devem considerar o uso de sensores específicos de PPF ou irradiância espectral.

No contexto deste trabalho, pelo baixo custo e fácil acesso, o BH1750 será utilizado para monitorar a intensidade luminosa no interior da estufa, fornecendo dados fundamentais para o gerenciamento da iluminação artificial, sobretudo durante a germinação de mudas. A possibilidade de associar as leituras do sensor com o acionamento de lâmpadas LED permite ajustar o fornecimento de radiação ativa.

2.1.6 Lâmpada *full spectrum*

A iluminação artificial desempenha papel essencial no desenvolvimento de plântulas em sistemas agrícolas controlados, podendo ser utilizada em ambientes indoor, onde não há exposição direta à luz solar. A utilização de fontes de luz artificiais adequadas permite substituir completamente a luz natural, desde que o espectro e a intensidade luminosa atendam às exigências fotobiológicas das plantas. Com o avanço da tecnologia LED, tornou-se possível fornecer radiação fotossinteticamente ativa (PAR) — entre 400 e 700 nm — de maneira eficiente e com menor consumo

energético.

Estudos já mencionados, como o de Lin *et al.* (2013), indicam que a combinação de LEDs vermelhos e azuis (RB) favorece a fotossíntese e o desenvolvimento morfológico das plantas, especialmente em cultivos hidropônicos. Segundo os autores, essa combinação contribui para o acúmulo de açúcares solúveis e a redução de nitratos nas folhas de alface, melhorando tanto o crescimento quanto a qualidade nutricional da planta. A adição de luz branca (RBW) ao sistema também demonstrou efeitos positivos na qualidade sensorial e no equilíbrio do crescimento vegetativo.

Nesse contexto, os LEDs *Full Spectrum* surgem como solução eficaz, por abrangerem uma faixa contínua de comprimentos de onda que cobre integralmente a região PAR. Esse tipo de iluminação reproduz com maior fidelidade o espectro da luz solar, atendendo às diferentes exigências dos pigmentos fotossensíveis ao longo das fases do ciclo da planta — como germinação, desenvolvimento vegetativo e floração. A Figura 11 mostra uma lâmpada *full spectrum* comercial.

Figura 11 – Lâmpada
full spectrum



Fonte: Green Power (2025).

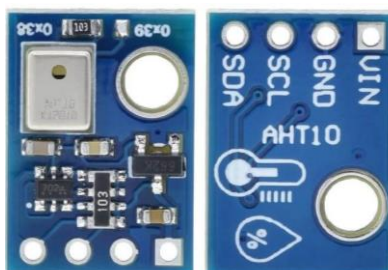
As lâmpadas LED *Full Spectrum* diferem das tradicionais luzes de cultivo compostas apenas por LEDs monocromáticos (vermelho e azul) ao utilizarem um revestimento de fósforo sobre LEDs emissores de luz azul (Waveform Lighting, 2025). Esse revestimento tem a capacidade de absorver a radiação de um comprimento de onda estreito — geralmente na faixa do azul (~460 nm) — e reemitir luz em uma faixa

mais ampla de comprimentos de onda maiores, como o verde, o amarelo e o vermelho (entre 600 e 700 nm). Ao aplicar uma mistura adequada de fósforos, é possível obter uma distribuição espectral contínua ao longo de grande parte do espectro visível, resultando em uma emissão de luz branca balanceada. Esse processo permite que a lâmpada simule com maior fidelidade a luz solar, cobrindo a radiação fotossinteticamente ativa (PAR).

2.1.7 Sensor de umidade e temperatura

O sensor AHT10 é um dispositivo digital compacto utilizado para a medição de temperatura e umidade relativa do ar. Ele se destaca por sua boa precisão, baixo consumo de energia e interface de comunicação simplificada via protocolo I²C. Fabricado pela Aosong Electronics, o AHT10 integra, em um único encapsulamento, um sensor capacitivo de umidade, um sensor de temperatura baseado em banda de silício e um conversor analógico-digital, oferecendo resolução de até 0,01 °C e 0,024 % UR para cada variável (Aosong, 2018). A Figura 12 mostra o sensor adquirido para este projeto.

Figura 12 – Sensor para umidade do substrato.



Fonte: Autor (2025).

O sensor já vem calibrado de fábrica e realiza compensações internas, o que permite sua utilização em aplicações que exigem monitoramento em ambientes variáveis, como o caso de uma estufa. Opera dentro de faixas de -40 °C a 85 °C para temperatura e de 0 % a 100 % para umidade relativa, com precisão típica de $\pm 0,3$ °C e ± 2 % UR. Seu encapsulamento em SMD e operação a 1,8–3,6 V junto a disponibilidade de dados via I²C tornam o AHT10 ideal para integração em sistemas

embarcados com microcontroladores.

O uso do sensor AHT10, capaz de monitorar simultaneamente temperatura e umidade relativa do ar, é peça importante para este projeto pois, essas variáveis se mostram críticas especialmente para cultivos de alface, como demonstrado por Mendes *et al.* (2021), cujo estudo evidenciou que temperaturas elevadas podem comprometer significativamente a taxa de germinação da espécie. Assim, o monitoramento contínuo dessas variáveis permite avaliar se o ambiente está dentro das faixas ideais, auxiliando na tomada de decisões sobre iluminação, ventilação e irrigação no sistema automatizado.

2.1.8 Sensor de umidade do solo

Os sensores resistivos de umidade do substrato operam com base em um princípio eletrofísico simples: a variação da condutividade elétrica do meio conforme seu teor de água. O funcionamento consiste em aplicar uma diferença de potencial entre dois eletrodos metálicos inseridos no substrato. A passagem de corrente elétrica entre os eletrodos é modulada pela presença de íons dissolvidos na água contida no meio, tornando a resistência elétrica inversamente proporcional ao conteúdo de umidade.

Essa relação pode ser descrita pela equação (3) da Lei de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} \quad (3)$$

em que R é a resistência elétrica entre os eletrodos, V é a tensão aplicada e I a corrente resultante. Conforme descrito por Meter Group (2023), sensores baseados nesse princípio não medem diretamente a água, mas sim a condutividade elétrica proporcionada pelos íons dissolvidos: "são os íons na água que transportam a corrente de um eletrodo para o outro". À medida que o substrato se torna mais úmido, a concentração de íons livres aumenta, favorecendo a condução elétrica e reduzindo a resistência medida. Em contrapartida, quando o substrato está seco, a resistência entre os eletrodos se eleva, pois há menos água para permitir o transporte de cargas.

A condutância elétrica, definida como o inverso da resistência, pode ser

expressa pela equação (4):

$$G = \frac{1}{R} \quad (4)$$

onde G representa a facilidade com que a corrente elétrica atravessa o substrato. Dessa forma, substratos mais úmidos exibem maior condutância elétrica.

Na prática, o sensor utilizado neste trabalho opera com um divisor de tensão resistivo, no qual a resistência variável do substrato atua como um dos elementos do circuito. A tensão de saída V_{out} é lida por um conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador e pode ser descrita pela seguinte equação (5):

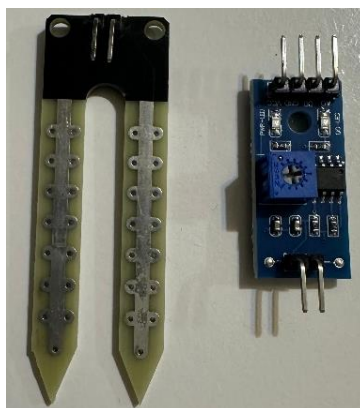
$$V_{out} = V_{cc} \cdot \left(\frac{R_{sensor}}{R_{fixo} + R_{sensor}} \right) \quad (5)$$

onde V_{cc} é a tensão de alimentação, R_{fixo} é uma resistência de referência conhecida, e R_{sensor} é a resistência entre os eletrodos, que varia conforme o teor de umidade do substrato. Valores mais baixos de R_{sensor} , típicos de substratos úmidos, resultam em tensões maiores na saída do divisor e, portanto, são interpretados como maior umidade pelo sistema.

Os valores obtidos por esse circuito podem ser calibrados empiricamente com base no teor de água desejado para o substrato. Embora sensores resistivos não apresentem a mesma precisão de tecnologias mais avançadas, como os sensores eletromagnéticos (TDR, capacitivos e de frequência), o artigo de Vaz *et al.* (2013) realiza uma análise abrangente sobre a resposta e calibração de diferentes sensores com princípios variados. O estudo evidencia que a medição do teor de umidade do solo não é trivial, sendo fortemente influenciada por características físicas e químicas do meio, como textura, salinidade e densidade. Nesse contexto, torna-se evidente que sensores de maior complexidade exigem calibração cuidadosa para fornecer dados confiáveis. No entanto, para os propósitos deste trabalho, que envolvem a automatização e monitoramento de um ambiente conduzido para germinação de mudas, o sensor resistivo adotado é suficiente para fornecer uma estimativa qualitativa da umidade do substrato, permitindo ao sistema identificar situações como

“seco” ou “úmido” e permitir o sistema atuar de forma autônoma conforme necessário. A Figura 13 mostra o sensor adquirido para este trabalho.

Figura 13 – Sensor para umidade do substrato.



Fonte: Autor (2025).

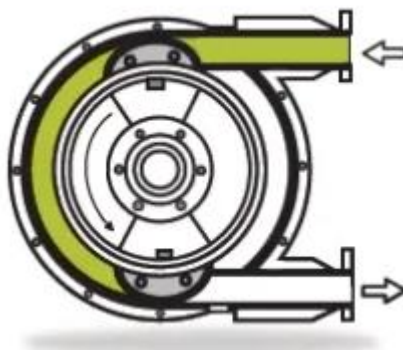
2.1.9 Bomba peristáltica

A bomba peristáltica é um tipo de bomba de deslocamento positivo que transporta fluidos por meio da compressão sequencial de um tubo flexível. Seu princípio de funcionamento baseia-se na ação de roletes ou sapatas que pressionam o tubo contra uma superfície, empurrando o líquido em seu interior de forma contínua e controlada. Quando o ponto de compressão se move ao longo do tubo, o vácuo gerado permite que mais fluido seja puxado para dentro do sistema (Albin Pump, 2023).

Uma das principais vantagens das bombas peristálticas é que o fluido entra em contato apenas com o interior do tubo, o que reduz significativamente o risco de contaminação e facilita a manutenção. Isso as torna especialmente adequadas para aplicações em laboratórios, processos industriais delicados e sistemas automatizados de irrigação, como os utilizados em ambientes conduzidos para cultivo de plântulas. Além disso, essas bombas permitem dosagem precisa de volumes reduzidos de líquido, característica relevante em contextos onde o controle da umidade do substrato é importante para o sucesso da germinação. Em função de sua simplicidade de operação e baixo custo, a bomba peristáltica de pequeno porte foi escolhida para atuar no sistema de irrigação do experimento proposto neste trabalho. A Figura 14 ilustra o

princípio de funcionamento de uma bomba peristáltica.

Figura 14 – Bomba peristáltica.



Fonte: Albin Pump (2023).

2.2 PESQUISAS RELACIONADAS

Esta seção apresenta projetos de pesquisa com tecnologias e abordagens similares com o proposto neste projeto de pesquisa. Com o objetivo de ser uma referência que relacione a tecnologia que foi utilizada em outros projetos para solucionar este projeto.

2.2.1 Development of an IoT-Based Precision Irrigation System for Tomato Production from Indoor Seedling Germination to Outdoor Field Production

O estudo desenvolvido por Seyar e Ahamed (2023) foi conduzido no Laboratório de Bioprodução e Máquinas do Centro de Pesquisa e Inovação em Plantas de Tsukuba (T-PIRC), no Japão. Seu principal objetivo foi o desenvolvimento de um sistema de irrigação capaz de minimizar perdas hídricas e identificar o teor ideal de umidade do solo para garantir o sucesso na germinação e no transplante de mudas de tomate, em um processo que se estende desde ambientes fechado até o cultivo em campo aberto.

Durante a fase de germinação, o experimento foi estruturado com monitoramento de variáveis ambientais fundamentais, como temperatura do ar, umidade relativa, intensidade luminosa e teor de umidade do solo. A iluminação

artificial foi fornecida de maneira uniforme, com o uso de um temporizador programado para fornecer 15 horas de luz por dia, a fim de garantir condições fotoperiódicas ideais para o desenvolvimento das plântulas. A irrigação foi controlada com base em quatro faixas específicas de umidade do solo (5%, 8%, 12% e 15%), testadas ao longo de três ciclos completos de cultivo.

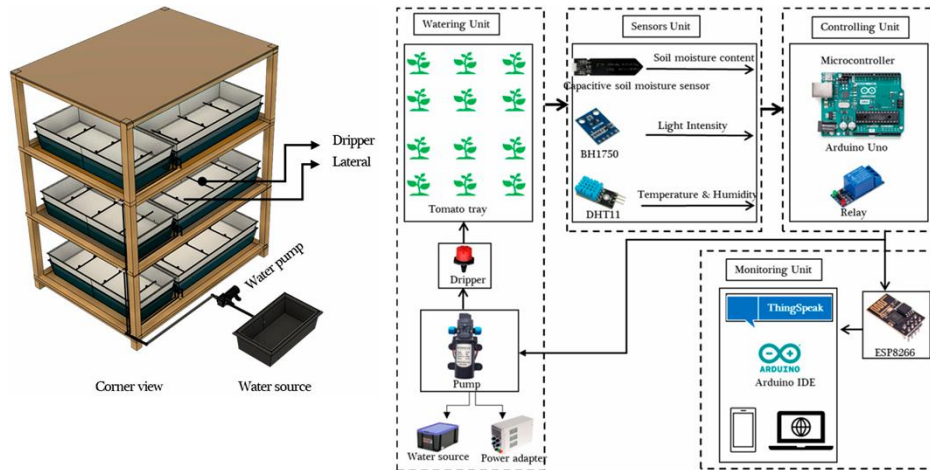
Os sensores de umidade utilizados eram capacitivos de baixo custo, previamente calibrados com sensores de alta precisão. Para essa calibração, amostras de solo com diferentes níveis de umidade (de seco a saturado) foram alocadas em recipientes separados, possibilitando a comparação e validação das leituras. Os dados obtidos foram analisados por regressão, e os coeficientes de correlação obtidos foram incorporados à programação dos microcontroladores, permitindo assim a correção automática das leituras em tempo real e aumentando a confiabilidade do sistema de irrigação.

A infraestrutura IoT adotada no experimento foi composta por um Arduino Uno, responsável pela aquisição dos dados dos sensores e pelo acionamento da irrigação, em conjunto com um módulo Wi-Fi ESP8266, utilizado para conectar o sistema à internet. A instrumentação foi feita com o uso de sensores de luminosidade BH1750, sensores de temperatura e umidade relativa DHT11 e os sensores capacitivos de umidade do solo mencionados. Todos os dados coletados eram enviados periodicamente para a plataforma ThingSpeak, permitindo monitoramento remoto em tempo real e armazenamento histórico dos parâmetros ambientais.

Os resultados da fase de germinação demonstraram que a umidade do solo teve impacto direto na taxa de emergência das sementes de tomate. O menor desempenho foi observado com o limiar de 5%, enquanto os valores de 12% e 15% proporcionaram as maiores taxas de germinação. Contudo, o limiar de 12% foi considerado o mais adequado, por representar o melhor equilíbrio entre disponibilidade de água e eficiência na absorção pelas raízes em desenvolvimento. Níveis superiores, como 15%, foram considerados excessivos, podendo comprometer a oxigenação do solo. O estudo conclui que os sensores de baixo custo, quando devidamente calibrados, foram eficazes no monitoramento da umidade e que suas leituras são adequadas como base para o agendamento automatizado da irrigação.

A Figura 15 mostra a estrutura do experimento para a fase de germinação dos tomates, bem como diagrama com os sensores e instrumentos utilizados.

Figura 15 – Prova de conceito e diagrama do experimento



Fonte: Seyar e Ahamed (2023).

A abordagem adotada por Seyar e Ahamed (2023) oferece importantes contribuições para o desenvolvimento do sistema proposto neste trabalho, especialmente no que se refere à organização da arquitetura eletrônica e à confiabilidade dos dados ambientais adquiridos. A utilização de dois microcontroladores complementares, sendo um dedicado à leitura e processamento local dos sensores (Arduino Uno) e outro responsável pela conectividade com a internet (ESP8266), é uma estratégia que pode ser replicada ou adaptada para distribuir tarefas e melhorar a estabilidade do sistema.

Além disso, o método empregado para a calibração dos sensores de umidade do solo, utilizando amostras com teores conhecidos e análise estatística dos dados, representa uma solução prática e eficaz para aumentar a precisão de sensores de baixo custo. Essa técnica não apenas valida o uso desses sensores em sistemas de irrigação automatizada, como também serve como referência metodológica importante para este projeto, em que a confiabilidade da medição da umidade do substrato é essencial para acionar a irrigação e manter as condições ideais de germinação. Portanto, o estudo analisado reforça a viabilidade do uso de tecnologias acessíveis, desde que acompanhadas de calibração e configuração criteriosa, dentro de uma lógica de automação sensoriada e conectada.

2.2.2 Sistema de controle de temperatura e umidade para germinação de sementes

Uma pesquisa diretamente relacionada ao tema deste trabalho foi desenvolvida por Rosa et al. (2024), e publicada na Revista Caderno Pedagógico. O estudo teve como foco o desenvolvimento de um sistema de controle automático para câmara de germinação de sementes, com ênfase na regulação das variáveis ambientais de temperatura e umidade. A proposta buscou investigar como a aplicação de técnicas de controle, especialmente o controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo), pode contribuir para garantir condições estáveis e adequadas ao desenvolvimento embrionário das sementes, independentemente da época do ano ou da localização geográfica.

A estrutura experimental desenvolvida pelos autores consistiu em uma estufa construída em acrílico, com sensores para monitoramento de temperatura e umidade do solo, além de atuadores como lâmpadas, coolers e bombas, gerenciados por um microcontrolador Arduino UNO. A lógica de controle implementada permitiu ajustes automáticos em função das leituras dos sensores, utilizando algoritmos de controle PID para estabilizar as variáveis conforme os valores de referência programados pelo usuário. Para validar o sistema, os autores realizaram experimentos com sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris*), submetidas a três diferentes faixas de temperatura: 25 °C, 28 °C e 30 °C.

Durante os testes, foram observadas variáveis como o percentual de germinação, o índice de velocidade de germinação (IVG), o tempo médio de germinação (TMG), bem como a evolução da umidade do solo e do ar ao longo dos ciclos de controle. Os resultados indicaram que a faixa de 28 °C apresentou o maior percentual germinativo, enquanto a temperatura de 30 °C resultou no maior índice de velocidade de germinação, embora também tenha exigido maior compensação no controle de umidade. A pesquisa também comparou o desempenho do sistema real com simulações realizadas no MATLAB e Simulink, utilizando o método IMC (Internal Model Control) como estratégia de sintonia para o controlador PID.

Com base nos resultados obtidos, os autores concluíram que o uso de sistemas automatizados com controle PID é uma alternativa viável para promover ambientes favoráveis à germinação, além de representar uma solução acessível para

experimentações acadêmicas e aplicações em pequena escala. A pesquisa também evidencia o potencial dessas tecnologias no contexto da agricultura urbana e de precisão, ao oferecer maior previsibilidade no manejo das variáveis ambientais. Assim, o estudo de Rosa et al. (2024) complementa e reforça os fundamentos do presente trabalho, ao demonstrar, na prática, como a automação pode contribuir para a melhoria do desempenho germinativo e para a consolidação de métodos de cultivo mais eficientes e tecnicamente orientados.

3 METODOLOGIA

Esta seção expõe o tipo de pesquisa e as técnicas a serem utilizadas no desenvolvimento deste projeto, destacando os procedimentos para coleta de resultados e os procedimentos para análise e interpretação de dados.

3.1 TIPO DE PESQUISA

Este trabalho pode ser caracterizado como uma pesquisa aplicada, com abordagem predominantemente qualitativa. A proposta consiste no desenvolvimento e validação de uma estufa automatizada IoT *indoor* para a fase de germinação de mudas de alface, utilizando sensores ambientais e atuadores gerenciados por microcontroladores programáveis.

A classificação como pesquisa aplicada se deve ao fato de que o projeto visa resolver um problema prático e real: proporcionar condições propícias e conduzidas para o desenvolvimento inicial de hortaliças em ambientes controlados.

A abordagem qualitativa está centrada na observação do comportamento das plântulas sob diferentes condições ambientais impostas pela automação da estufa, priorizando a compreensão dos efeitos gerados pelas alterações nas variáveis monitoradas e ajustadas. O foco recai sobre a interpretação e análise dos fenômenos observados durante o processo de germinação, considerando aspectos como vigor aparente, uniformidade de crescimento e resposta das plantas ao ambiente conduzido.

Por fim, trata-se de uma pesquisa experimental, uma vez que envolve a manipulação deliberada das condições de cultivo em um ambiente semicontrolado, possibilitando o teste da solução tecnológica proposta e a observação direta dos seus efeitos sobre as plantas.

3.2 UNIVERSO DE ABRANGÊNCIA DA PESQUISA

O problema abordado nesta pesquisa ocorre no contexto da germinação de sementes e produção de mudas em sistemas de cultivo *indoor*, onde não há acesso

à luz solar direta e o acompanhamento manual das condições ambientais é limitado. Esse cenário é comum em hortas urbanas, laboratórios acadêmicos, projetos de agricultura em espaços fechados e iniciativas de cultivo doméstico tecnificado.

O presente estudo delimita-se ao desenvolvimento e avaliação de uma estufa automatizada IoT de pequeno porte, voltada à fase de germinação de mudas de alface. A solução proposta busca responder à necessidade de monitoramento e controle autônomo de variáveis críticas para a germinação, como iluminação artificial, umidade do substrato e temperatura interna, com foco na redução da intervenção humana e maior uniformidade no desenvolvimento inicial das plantas.

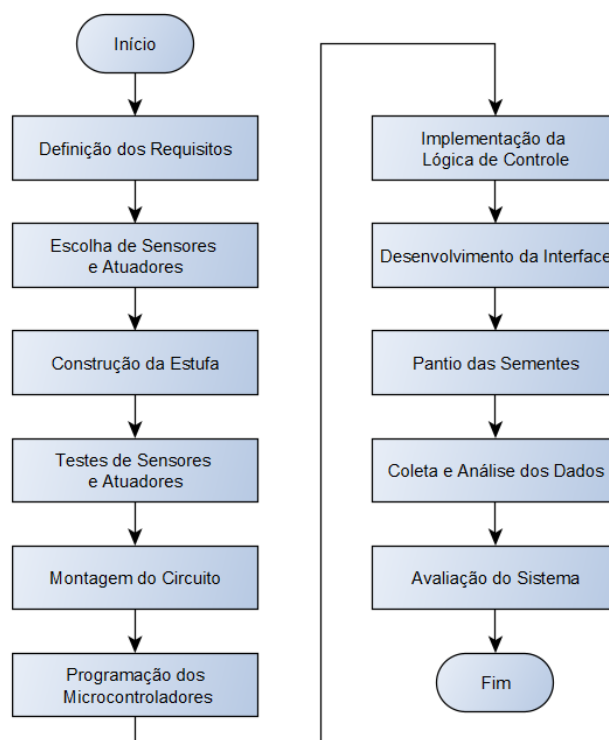
Embora a estrutura proposta possa futuramente ser adaptada a outras culturas ou fases do ciclo produtivo, este projeto não contempla o cultivo até a fase adulta da planta, nem o controle ativo da umidade relativa do ar ou da concentração de CO₂. Também não se propõe a comparar diferentes técnicas de germinação nem a realizar análises agronômicas do desempenho das mudas transplantadas após o experimento.

Assim, a pesquisa concentra-se na etapa inicial do cultivo, propondo uma solução viável e priorizando baixo custo para ambientes com infraestrutura limitada ou restrições de acompanhamento contínuo, com potencial de replicação em diferentes contextos urbanos, escolares ou experimentais.

3.3 MÉTODO APLICADO

O método para desenvolvimento deste trabalho é mostrado por meio de um fluxograma – apresentado pela Figura 16 conforme os símbolos padronizados pela norma ISO 5807, que define convenções para a documentação gráfica de algoritmos e processos (ISO, 1985) – onde há uma visão mais alto nível de cada etapa para execução do projeto.

Figura 16 - Fluxograma de desenvolvimento do projeto



Fonte: Autor (2025)

Cada etapa representada no fluxograma é essencial para a construção do sistema proposto. O processo inicia-se com a definição dos requisitos funcionais da estufa, incluindo dimensões físicas, variáveis a serem monitoradas e conduzidas, além da escolha e aquisição dos sensores e atuadores.

Em seguida, realiza-se a montagem da estrutura física da estufa e a integração dos componentes eletrônicos ao microcontrolador, responsável pela leitura dos sensores e pelo ajuste automatizado dos dispositivos. A comunicação entre os módulos pode ocorrer via barramento digital (como I²C) ou canais de ADC, e os sinais são processados por meio de *firmware* desenvolvido especificamente para a aplicação.

A lógica de gerenciamento será implementada no *firmware*, contemplando o acionamento das lâmpadas e do sistema de irrigação de acordo com os parâmetros ambientais definidos. Posteriormente, será desenvolvida uma interface de visualização dos dados e, caso previsto, o envio das leituras por comunicação sem fio.

Com o sistema finalizado, serão realizados testes experimentais com sementes

de alface, avaliando a resposta do sistema, a confiabilidade dos dados registrados e a influência das variáveis conduzidas no processo de germinação. Por fim, os dados obtidos serão analisados e interpretados para verificar a eficácia do sistema automatizado proposto.

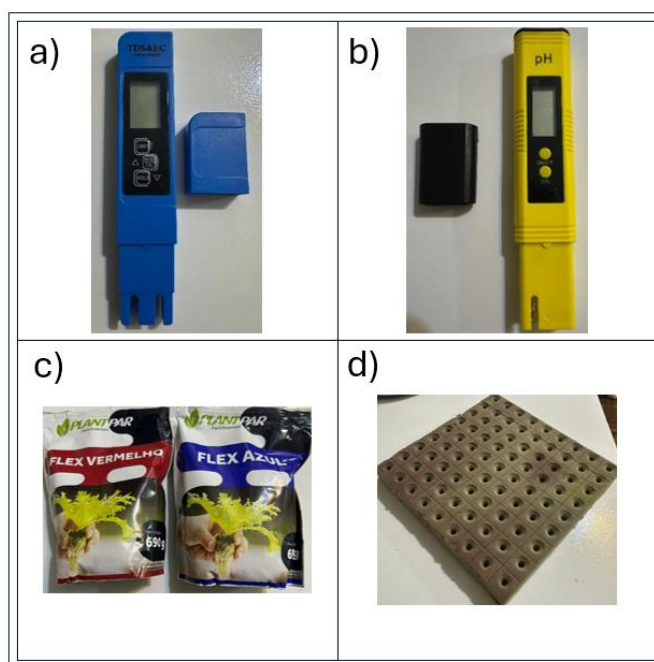
3.4 INSTRUMENTOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Esta seção apresenta os principais equipamentos e materiais utilizados para a implementação da prova de conceito proposta neste trabalho. Os itens foram selecionados com base nas necessidades funcionais do sistema de germinação.

A Figura 17 apresenta os principais materiais utilizados para o preparo do substrato e da solução nutritiva e para a viabilização da produção das mudas, bem como os instrumentos de aferição empregados durante o experimento. Os instrumentos de medição incluem um medidor digital de condutividade elétrica (EC) do tipo TDS-3, utilizado para estimar a concentração de sólidos dissolvidos na água. Embora não forneça a concentração exata de cada nutriente, o sensor permite monitorar a EC da solução, ajudando a manter os níveis dentro da faixa ideal para a fase de germinação. Complementarmente, foi utilizado um medidor digital de pH para garantir que a solução nutritiva estivesse dentro da faixa adequada para absorção dos nutrientes pelas raízes.

Para o preparo da solução nutritiva, foi utilizado o conjunto de fertilizantes hidrossolúveis destinados ao cultivo hidropônico de alface. As proporções foram ajustadas com base na condutividade elétrica da solução, seguindo as recomendações do fabricante e as diretrizes disponíveis em literatura especializada, que sugerem valores entre 0,8 e 1,3 mS/cm para a fase de germinação (Green Power, 2020). Como substrato, utilizou-se espuma fenólica, que é um material inerte feito de resina fenólica, que apresenta boa capacidade de retenção de água e ventilação. Nas misturas de substrato, é empregada como componente na forma moída ou compactada em cubos, servindo como meio para cultivar mudas, especialmente para cultivo hidropônico (EMBRAPA, 2020). Além de proporcionar bom suporte às sementes, essa espuma facilita o transplante das mudas para os sistemas hidropônicos, pois não se decompõe nem contamina a solução nutritiva e mantém a plântula firme sem necessidade de copos ou suportes adicionais.

Figura 17 – a) sensor de EC, b) sensor de PH, c) fertilizantes, d) espuma fenólica.



Fonte: Autor (2025)

3.5 PROCEDIMENTOS PARA COLETA DE RESULTADOS

A coleta de dados será conduzida a partir do funcionamento do protótipo da estufa automatizada, ao longo de um ciclo de germinação até a fase de mudas de alface, estimado em 15 a 20 dias. O plano experimental será conduzido em ambiente experimental semicontrolado, no qual algumas variáveis ambientais serão monitoradas e ajustadas por meio de intervenção assistida, com suporte de sistemas automatizados, enquanto outras permanecerão livres.

As variáveis manipuladas e monitoradas pelo sistema incluem:

- a) temperatura interna ($^{\circ}\text{C}$);
- b) umidade interna ($^{\circ}\text{C}$);
- c) umidade do substrato (%);
- d) iluminância (lux).

Esses dados serão coletados automaticamente por sensores digitais integrados ao microcontrolador e publicados em intervalos regulares, sendo utilizados para acionar dispositivos comandados (lâmpadas, irrigação e exaustor). Já as

variáveis ligadas ao desempenho biológico das plântulas — que constituem os objetivos principais do experimento — serão observadas e registradas manualmente, incluindo:

- a) taxa de germinação (%);
- b) tempo médio de emergência (dias);
- c) altura média das plântulas (cm);
- d) número médio de folhas por plântula.

Esses indicadores permitirão quantificar o desempenho da germinação em função das variáveis ambientais conduzidas. As avaliações seguirão critérios simples da literatura agrônômica, baseando-se em contagem visual e medições com régua ou paquímetro, realizadas sempre nos mesmos horários.

O operador do experimento será o próprio autor do projeto. Estão previstos possíveis níveis de incerteza, como oscilações naturais do ambiente externo, precisão limitada dos sensores de baixo custo e variações individuais entre sementes, os quais podem ser considerados na análise crítica dos resultados.

3.6 PROCEDIMENTO PARA ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

A análise dos resultados será conduzida em duas frentes complementares: a primeira voltada à validação do funcionamento do sistema automatizado, e a segunda dedicada à avaliação do desenvolvimento das plântulas ao longo da fase de germinação.

Na primeira etapa, será verificado se o sistema automatizado está operando conforme o esperado. Para isso, serão realizados testes individuais de cada sensor e atuador, com ênfase na coerência das leituras e no acionamento correto dos dispositivos. As leituras dos sensores de temperatura, umidade do substrato e iluminância serão comparadas com referências conhecidas, quando aplicável, e avaliadas quanto à sua estabilidade e resposta às variações do ambiente experimental. A lógica de gerenciamento será observada durante esse processo, permitindo validar a resposta do sistema às condições reais.

Na segunda etapa, será avaliado o desenvolvimento das plântulas de alface em função das condições estabelecidas pelo sistema. As observações serão realizadas em três momentos-chave do ciclo de germinação: no início (dia 1), após a

esperada germinação (dia 5) e no final do ciclo (dia 15 a 20, conforme desempenho). Em cada ponto, serão registradas as seguintes variáveis: taxa de germinação (% de sementes emergidas), altura média das plântulas (mm), número de folhas verdadeiras por muda.

Essas informações serão organizadas em tabelas simples e gráficos descritivos, que permitirão visualizar a evolução das mudas ao longo do tempo e associar os resultados obtidos ao funcionamento do sistema.

A interpretação dos dados será feita com base na coerência entre o ambiente automatizado proporcionado e o desempenho final das plântulas, considerando como referência os parâmetros ideais apresentados no referencial teórico. Mesmo sem monitoramento contínuo das variáveis ao longo dos dias, espera-se que o sistema automatizado contribua para condições mais estáveis e favoráveis à germinação.

Por fim, os dados obtidos servirão para validar a funcionalidade do sistema proposto e poderão embasar ajustes futuros no código, na calibração dos sensores ou nas rotinas de irrigação e iluminação.

4 RESULTADOS

Esta seção apresenta os resultados alcançados e os desenvolvimentos realizados para atingir o objetivo do trabalho proposto, demonstrando as implementações realizadas, os resultados e validações de funcionamento.

4.1 IMPLEMENTAÇÃO DA PROVA DE CONCEITO

Para criar um ambiente propício à germinação e ao desenvolvimento das plântulas, foi desenvolvida uma prova de conceito, abrangendo desde o projeto mecânico da estufa, responsável por abrigar as sementes e os sensores, até a confecção de um *hardware* dedicado, com suas respectivas ligações elétricas. A estrutura resultante permitiu testar o funcionamento integrado do sistema automatizado, validando a leitura das variáveis ambientais e o acionamento dos dispositivos de comando ou controle.

O desenvolvimento do projeto seguiu os passos descritos no fluxograma apresentado no capítulo de Metodologia, iniciando pela definição dos requisitos da estufa automatizada, passando pela seleção dos componentes, construção da estrutura física, montagem do circuito eletrônico e desenvolvimento do *firmware* responsável pelo gerenciamento das variáveis ambientais.

4.1.1 Projeto mecânico

O projeto mecânico da estufa foi desenvolvido com o objetivo de criar um ambiente compacto, funcional e adequado para a germinação conduzida de sementes de alface. A estrutura foi confeccionada em acrílico transparente, permitindo boa visualização interna.

Como ponto de partida para o dimensionamento, definiu-se que a prova de conceito deveria abrigar pelo menos 200 sementes de alface, as quais seriam acomodadas individualmente em cubos de espuma fenólica com dimensões de 2 cm×2cm (área de base), conforme descrito no capítulo de Metodologia.

Considerando que cada semente ocupa 4 cm² (área de base do cubo), a área total necessária pode ser estimada pela equação (6).

$$A_t = A^1 \times n = 4 \text{ cm}^2 \times 200 = 800 \text{ cm}^2 \quad (6)$$

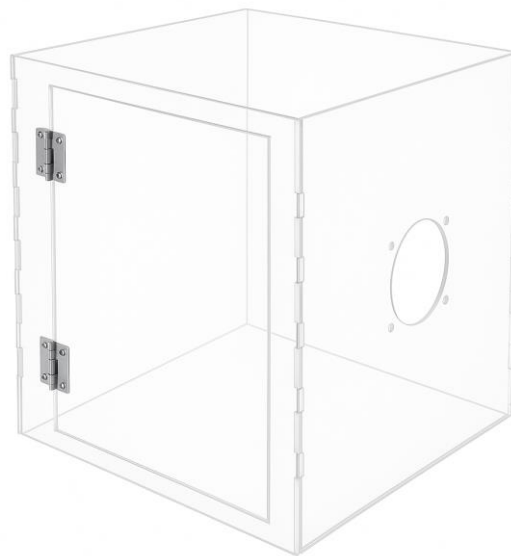
onde A_t é a área total, A_1 é a área individual de cada célula e n é o número de sementes. Considerando uma disposição quadrada, a dimensão lateral da área necessária pode ser estimada pela equação (7):

$$L = \sqrt{A_t} = \sqrt{800} \approx 28,28 \text{ cm} \quad (7)$$

onde L é dimensão lateral da área necessária. Considerando a ocupação de espaço mínima calculada de 28,28cm, foi definido que uma base mínima de 30cmx30cm seria suficiente para atender esse requisito inicial. Já a altura da estrutura foi definida em 380 mm, aproveitando o material disponível, e considerando uma margem vertical adequada para posicionar a fonte de luz artificial e, futuramente, ajustar sua distância em relação às mudas conforme a necessidade observada nos testes práticos.

A Figura 18 mostra uma representação 3D da estrutura projetada da câmara.

Figura 18 – 3D da câmara projetada em acrílico



Fonte: Autor (2025).

Como pode ser observado, o projeto levou em consideração as furações e

aberturas para a instalação do exaustor, bem como uma porta para acesso a área interna.

4.1.2 Instrumentação

Foi definido que as variáveis mínimas a serem monitoradas no sistema seriam: temperatura e umidade do ar, umidade do substrato e iluminância. Já como variáveis conduzidas, estabeleceu-se a umidade do substrato, a iluminância interna e, indiretamente, a temperatura. Portanto, os atuadores selecionados deveriam ser capazes de realizar o ajuste da irrigação (bombeando água ou solução nutritiva), fornecer iluminação artificial adequada ao crescimento das plântulas e permitir a circulação de ar no interior da câmara. A escolha dos sensores e atuadores considerou os critérios técnicos apresentados no capítulo de referencial teórico, levando em consideração a compatibilidade com microcontroladores, simplicidade de integração e custo-benefício.

O Quadro 1 apresenta a relação dos instrumentos adquiridos para cada finalidade.

Quadro 1 – Instrumentos adquiridos para o projeto

Instrumento	Finalidade
Módulo BH1750	Medir iluminância
Módulo AHT10	Medir umidade e temperatura ambiente
Sensor resistivo baseado no LM393	Medir a umidade do substrato
Bomba peristáltica 5 Vcc	Irrigar o substrato
Lâmpada <i>full spectrum</i> 127 Vca de 28 W	Servir de fonte de luz artificial
Exaustor 12 Vcc	Diminuir a temperatura interna

Fonte: Autor (2024).

4.1.3 Projeto de *hardware*

A placa de controle do sistema foi projetada com o objetivo de centralizar as funções de aquisição de dados, leitura de sensores, comunicação com microcontroladores e acionamento dos atuadores. Ela foi desenvolvida para integrar

os diversos módulos do projeto de forma organizada e eficiente, facilitando a conexão com periféricos e a alimentação dos dispositivos embarcados.

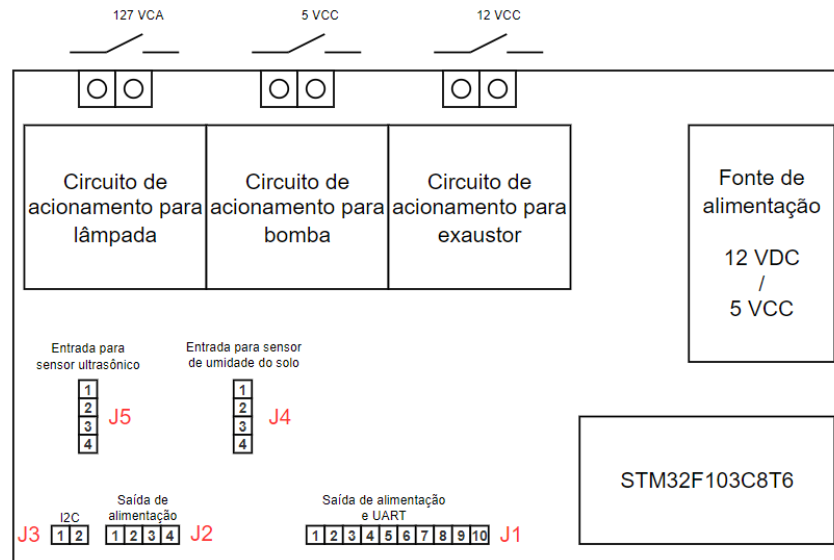
A fonte de alimentação utilizada no projeto é composta por um módulo conversor CC-CC do tipo *step-down*, baseado no circuito integrado LM2596. Esse módulo tem como função reduzir a tensão de entrada de 12 Vcc para 5 Vcc, atendendo aos requisitos de alimentação dos sensores, microcontroladores e periféricos digitais do sistema. O gerenciamento e leitura dos dispositivos é realizado por um *devkit* com o microcontrolador STM32F103C8T6.

A leitura da umidade do substrato é feita por meio de um canal de ADC (Conversor Analógico-Digital) do STM32, enquanto os sensores de iluminância (BH1750) e temperatura e umidade relativa (AHT10) são conectados ao barramento I²C, que também está disponível em um conector dedicado na placa.

Os circuitos de acionamento dos atuadores foram desenvolvidos de forma a garantir a compatibilidade elétrica entre os dispositivos de comando e os elementos de potência. Cada canal de saída é composto por um circuito com resistor de polarização, transistor de chaveamento, diodo de roda livre para proteção contra picos de tensão e um relé eletromecânico, que assegura o isolamento galvânico entre as cargas acionadas e a placa. Essa solução permitiu o comando de dispositivos operando em diferentes níveis de tensão, utilizando os mesmos sinais de comando do microcontrolador. A bomba de irrigação foi alimentada com 5 Vcc, o exaustor com 12 Vcc, e a lâmpada LED com 127 Vca.

A Figura 19 mostra um diagrama simplificado do *hardware* proposto para a placa principal que realiza o gerenciamento.

Figura 19 – Diagrama simplificado da placa de gerenciamento

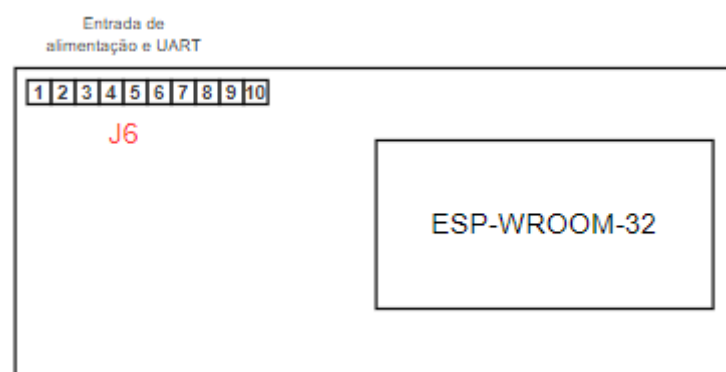


Fonte: Autor (2025).

O conector J1 é responsável por fornecer alimentação ao módulo de conectividade e permitir comunicação via UART. O conector J2 provê alimentação auxiliar para periféricos, enquanto o J3 oferece acesso ao barramento I²C. O conector J4 é dedicado ao sensor resistivo de umidade do solo, conectado a um canal analógico do microcontrolador. Já o conector J5 permite que um módulo com sensor ultrassônico possa ser integrado no projeto, a fim de realizar a leitura do nível do reservatório com a solução nutritiva, porém a utilização deste não será abordada neste trabalho, ficando como melhorias futuras.

A Figura 20 mostra um diagrama simplificado do módulo de conectividade.

Figura 20 – Diagrama simplificado da placa de conectividade.

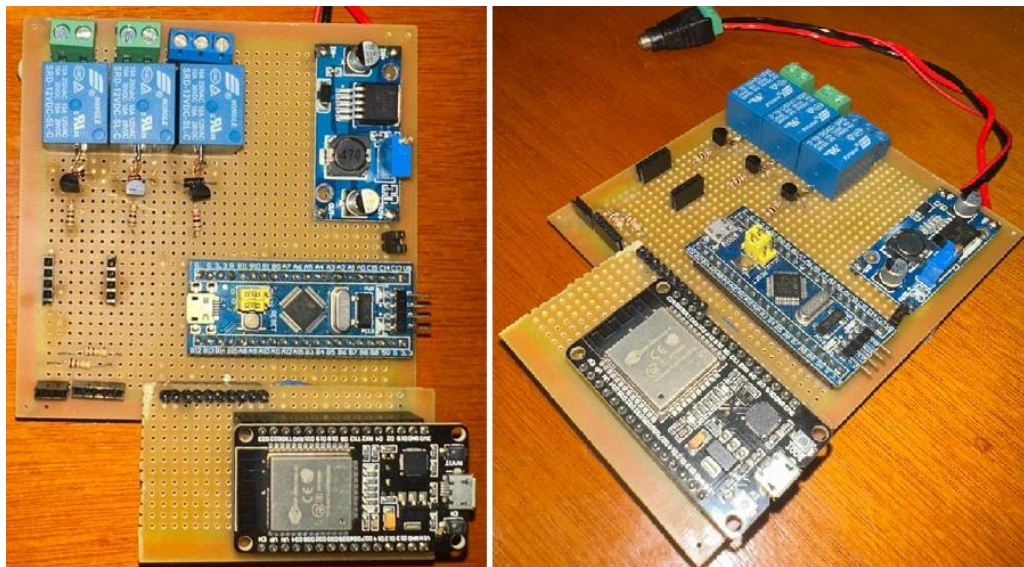


Fonte: Autor (2025).

O conector J6 é responsável por fornecer alimentação ao módulo de conectividade e permitir comunicação via UART.

Após a confecção de ambos, os resultados do desenvolvimento do *hardware* completo podem ser vistos pela Figura 21 com a placa de gerenciamento e módulo de conectividade integradas.

Figura 21 – placa de gerenciamento e placa de conectividade integradas.



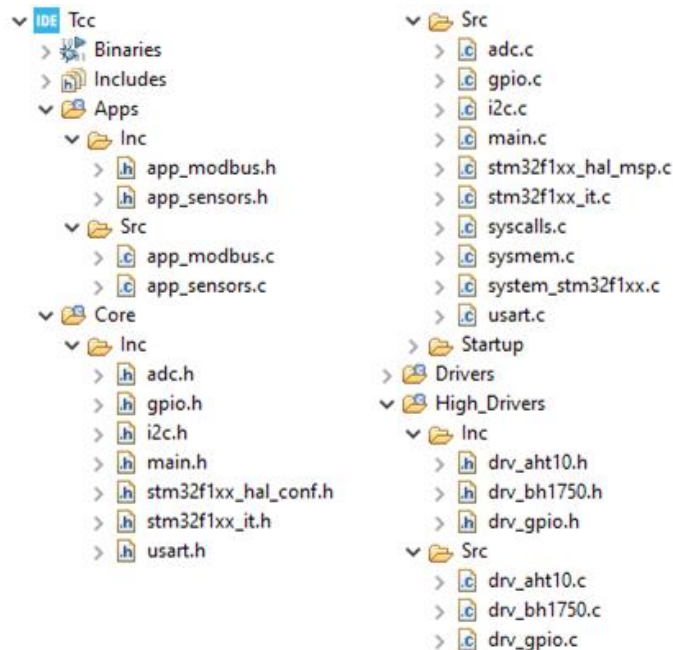
Fonte: Autor (2025).

4.1.4 Projeto de *firmware*

Como o sistema é composto por dois microcontroladores, um dedicado à aquisição de dados e gerenciamento local, e outro responsável pela conectividade, foi necessário o desenvolvimento de dois *firmwares* distintos. Nesta seção, será apresentada inicialmente a estrutura e funcionamento do *firmware* desenvolvido para o microcontrolador de gerenciamento, baseado no STM32F103C8T6.

O desenvolvimento foi realizado na IDE fornecida pelo fabricante, disponibilizada pela própria STMicroelectronics, que permite configurar os periféricos, gerar código inicial e organizar o projeto de forma modular. A Figura 22 ilustra a árvore final de arquivos do *firmware* implementado para a placa de controle. A seguir, serão descritas a arquitetura adotada e as principais unidades funcionais que compõem o código.

Figura 22 – Estrutura de arquivos do *firmware* de gerenciamento.



Fonte: Autor (2025).

O *firmware* foi desenvolvido com base no conceito de arquitetura em camadas, onde os níveis superiores utilizam os serviços das camadas inferiores. Essa abordagem modular facilita a manutenção e a portabilidade do sistema, permitindo que alterações específicas no *hardware* exijam apenas ajustes nas camadas mais baixas, sem comprometer o funcionamento das aplicações superiores.

Na camada mais elevada encontra-se o arquivo `main.c`, responsável pela inicialização dos drivers e pela execução das aplicações principais. Entre as aplicações, a `app_modbus` utiliza os serviços do driver de UART para implementar a comunicação no protocolo Modbus RTU sobre UART, configurando o microcontrolador STM32 como um dispositivo escravo (*slave*). A aplicação organiza suas variáveis em uma tabela de registradores *modbus*, que centraliza os valores lidos pelos sensores e os comandos recebidos da interface externa.

Outra aplicação importante é a `app_sensors`, responsável pela leitura dos sensores conectados ao sistema. Essa aplicação faz uso dos drivers desenvolvidos `drv_aht10`, `drv_bh1750` e da leitura direta do ADC para o sensor resistivo de umidade do solo. Além da aquisição de dados, `app_sensors` também é encarregada de

interpretar uma receita pré-definida, que contém parâmetros como tempo de irrigação e temperatura máxima permitida com histerese, permitindo que o sistema reaja autonomamente conforme o ambiente monitorado.

Por fim, os drivers `drv_aht10`, `drv_bh1750` e `drv_gpio` compõem a camada inferior do *firmware*, sendo responsáveis pela comunicação direta com os sensores e periféricos do sistema. Esses módulos utilizam as bibliotecas do fabricante geradas pelo STM32CubeMX (como HAL e LL), e implementam as rotinas específicas de leitura e escrita via protocolo I²C, além do controle de pinos digitais. Dessa forma, os drivers encapsulam os detalhes de *hardware* e disponibilizam funções de mais alto nível para as aplicações, garantindo a modularidade e facilitando eventuais substituições de sensores ou portas de comunicação no futuro.

O *firmware* do módulo de conectividade foi desenvolvido para o microcontrolador ESP32, utilizando a interface da plataforma Arduino. Essa escolha se deu pela ampla disponibilidade de bibliotecas de terceiros e *stacks* de rede e protocolos, o que permitiu acelerar o processo de desenvolvimento, especialmente nas etapas de comunicação sem fio e integração com serviços externos.

Neste projeto, o ESP32 atua como mestre Modbus RTU, realizando leituras e escritas nos registradores do microcontrolador STM32 por meio da interface UART. As variáveis lidas e os comandos enviados são organizados em uma tabela de registradores no STM32, conforme descrito anteriormente, permitindo a sincronização contínua entre os dois *firmwares*. Simultaneamente, o ESP32 estabelece conexão com a rede local via Wi-Fi, e interage com um *broker* MQTT público, hospedado em `test.mosquitto.org`, para permitir a troca de informações com uma interface externa, como um sistema SCADA.

A estrutura dos tópicos MQTT foi projetada estrategicamente para refletir de forma clara e organizada os registradores *modbus* acessados no STM32. A convenção adotada segue o padrão “Tcc/{origem}/Reg_{número}”.

Com isso, o ESP32 publica os dados nos tópicos do tipo `Tcc/Esp32/#`, com intervalo definido de 5s, representando as variáveis adquiridas localmente, e se subscreve aos tópicos `Tcc/Eclipse/#`, por onde recebe comandos que devem ser redirecionados ao microcontrolador de gerenciamento. Esse padrão de nomes permite uma comunicação estruturada, extensível e compatível com sistemas baseados em MQTT.

Esse arranjo garante que o módulo de conectividade funcione como uma ponte eficiente entre o ambiente de controle local e a rede, promovendo a escalabilidade e a interoperabilidade do sistema proposto.

O Quadro 2 apresenta a organização dos 6 primeiros registradores.

Quadro 2 – Relação dos registradores *modbus*

Registrador	Tópico MQTT vinculado	Descrição
0	Tcc/{origem}/Reg_0	Iluminância
1	Tcc/{origem}/Reg_1	Umidade do substrato
2	Tcc/{origem}/Reg_2	Temperatura interna
3	Tcc/{origem}/Reg_3	Umidade interna
4	Tcc/{origem}/Reg_4	Status dos relés
5	Tcc/{origem}/Reg_5	Comando dos relés

Fonte: Autor (2024).

4.1.5 Desenvolvimento da interface

Para a interface com usuário, foi utilizado o *software* Eclipse E3, uma plataforma SCADA amplamente adotada na indústria para supervisão e controle de processos automatizados. O objetivo da interface desenvolvida foi permitir o monitoramento em tempo real das variáveis medidas, bem como o comando manual dos atuadores presentes na estufa de germinação.

A interface foi estruturada de forma simples e intuitiva, com blocos gráficos representando os principais sensores e atuadores. No lado direito da tela, são exibidos os valores medidos de iluminância (lux), temperatura (°C), umidade relativa do ar (%) e umidade do substrato (valor bruto do sensor resistivo).

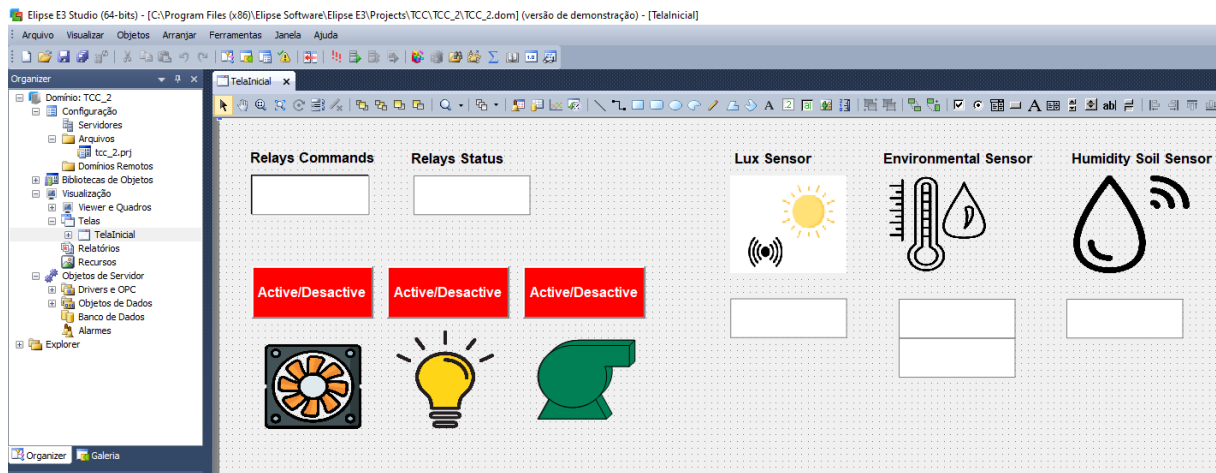
Na parte inferior da tela, ícones representando os atuadores (ventilador, lâmpada e bomba) são acompanhados por botões de comando, permitindo o acionamento e desligamento manual de cada dispositivo. O estado atual de cada relé (ativo ou inativo) também é exibido, permitindo uma visualização clara do funcionamento do sistema.

A interface foi projetada para facilitar testes e validações durante a etapa de prototipagem, fornecendo uma forma visual de verificar o comportamento dos

sensores e dos comandos enviados ao sistema. A escolha do Elipse E3 se deu pela robustez do software e gama de funcionalidades que poderiam ser implementadas futuramente, como alarmes, histórico dos dados entre outros.

A Figura 23 mostra a tela principal desenvolvida para este trabalho.

Figura 23 – Tela principal desenvolvida no Elipse Studio E3.



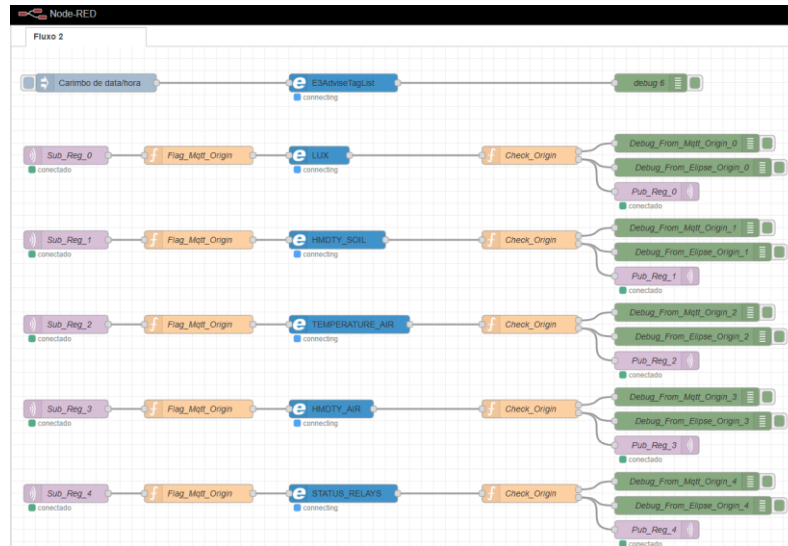
Fonte: Autor (2025).

É importante salientar que, embora a Elipse disponibilize um driver de comunicação MQTT, a utilização do Elipse E3 Studio em modo de demonstração impõe restrições quanto ao uso de drivers. De acordo com a documentação oficial (Elipse Software, 2021), drivers com nível superior a 0 (zero) não são permitidos nesse modo, o que inviabiliza diretamente a integração nativa com o *broker* MQTT.

Para contornar essa limitação, optou-se pelo uso do driver NodeRED, que possui nível 0 (zero) e é compatível com a versão demo. Com isso, uma aplicação no ambiente Node-RED foi desenvolvida para atuar como intermediária entre o sistema SCADA e o *broker* MQTT. A aplicação se comporta como cliente MQTT, conectando-se ao *broker*, assinando os tópicos de interesse e publicando comandos provenientes do Elipse E3.

A Figura 24 apresenta parte da aplicação desenvolvida e implementada no Node-RED.

Figura 24 – Fluxo desenvolvido no Node-RED.

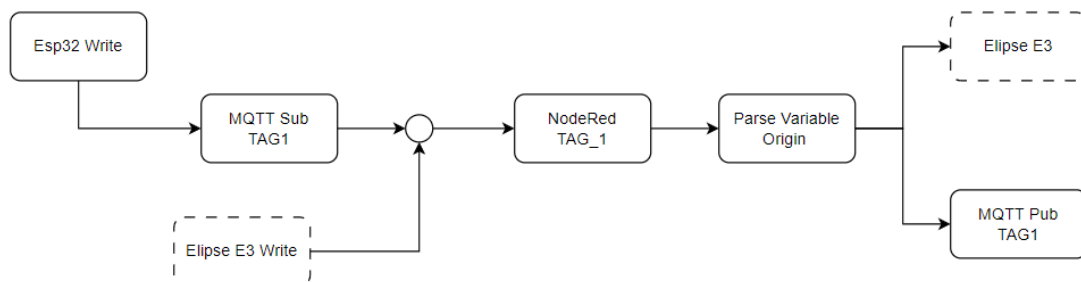


Fonte: Autor (2025).

Como o driver do Elipse atualiza as TAGs sempre que ocorre uma escrita (seja via aplicação Elipse ou via Node-RED), foi implementado um mecanismo de controle que evita loops de publicação. Para isso, cada variável recebida via MQTT é marcada com uma *flag*, indicando sua origem. Caso ocorra uma alteração de valor sem essa marcação, presume-se que a ação partiu do Elipse, autorizando o envio do novo valor para o *broker*. Essa lógica evita o efeito de "eco" entre as aplicações.

A Figura 25 apresenta um diagrama para ilustrar o fluxo de dados que representa essa estratégia de controle de publicações.

Figura 25 – Diagrama do fluxo de dados da solução de contorno.



Fonte: Autor (2025).

4.1.6 Confeccção da estufa automatizada

Após a conclusão das etapas anteriores descritas, foi realizada a montagem final da estufa, incluindo as ligações elétricas, a fixação dos instrumentos e a montagem estrutural da câmara. O resultado do sistema completo pode ser observado na Figura 26.

Figura 26 – Estufa automatizada confeccionada.



Fonte: Autor (2025).

4.2 FLUXO DE FUNCIONAMENTO

Esta seção apresenta o fluxo de funcionamento da estufa automatizada desenvolvida, detalhando as etapas desde a preparação inicial até a operação contínua do sistema. A sequência de ações foi projetada para garantir o correto monitoramento ambiental e a atuação dos dispositivos conforme comandos recebidos remotamente.

O processo tem início com a inserção da espuma fenólica contendo as sementes no interior da câmara. Em seguida, a porta é fechada e o sistema é energizado. Uma vez ligado, o dispositivo inicia a leitura dos sensores de temperatura, umidade, umidade do solo e iluminância.

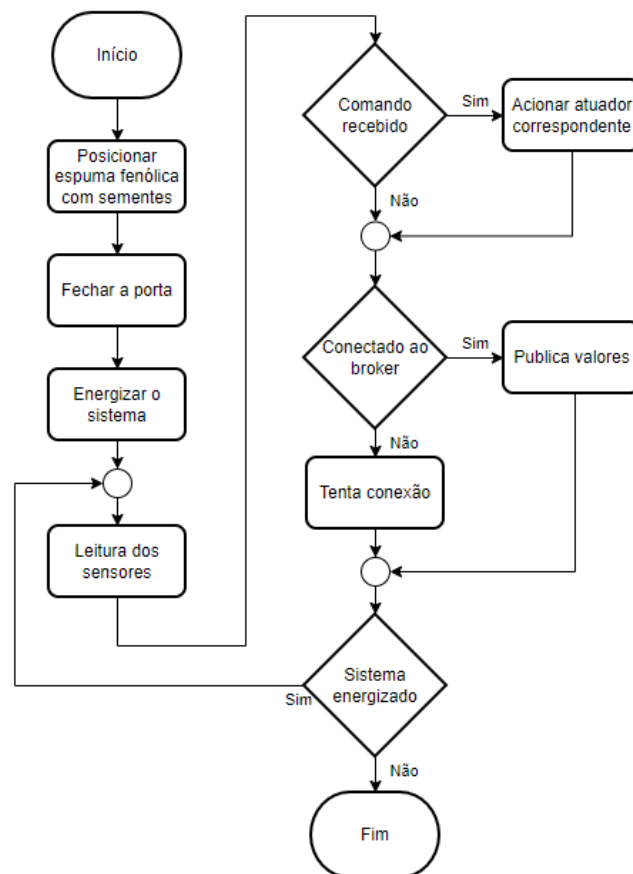
Com o sistema energizado, também se inicia o monitoramento da conectividade. Caso o microcontrolador esteja conectado ao broker MQTT, os dados são publicados na nuvem. Se não houver conexão, o dispositivo tentará reconectar

automaticamente.

Além disso, o sistema verifica continuamente se há comandos recebidos para acionamento dos atuadores (como iluminação, exaustor ou irrigação), executando as ações conforme necessário.

A Figura 27 ilustra esse fluxo de funcionamento, destacando os principais pontos de decisão e a lógica de operação contínua adotada durante os testes da estufa automatizada.

Figura 27 – Fluxograma de funcionamento.



Fonte: Autor (2025).

4.3 TESTES EXPERIMENTAIS REALIZADOS

Após a conclusão da implementação da prova de conceito, foram realizados testes experimentais com o objetivo de validar o funcionamento do sistema automatizado de germinação sensoriada sob as condições previstas de operação. Os testes buscaram avaliar a resposta dos sensores, a confiabilidade na comunicação

dos dados e o comportamento dos atuadores em resposta aos comandos emitidos remotamente.

Foram realizadas diferentes etapas de validação, abordando desde a calibração da irrigação até a verificação da transmissão de dados entre os módulos do sistema e o acionamento remoto dos atuadores. Cada um desses testes será apresentado em detalhes nas subseções a seguir.

4.3.1 Avaliação da vazão da bomba peristáltica

Com o objetivo de estimar a quantidade de líquido fornecida ao substrato durante o acionamento do sistema de irrigação, foi realizado um teste experimental para determinar a vazão da bomba peristáltica utilizada no projeto. Segundo especificações do fabricante, o componente opera com tensões entre 6 Vcc e 12 Vcc, podendo alcançar vazões de até 500 mL/min. No entanto, durante os testes preliminares, observou-se que, quando alimentada com tensões elevadas, a bomba apresentava vibrações excessivas, o que comprometia a estabilidade física do sistema e provocava intermitências elétricas causadas pela fricção nas conexões do *hardware* desenvolvido, afetando o funcionamento da placa de controle.

Além disso, a alta vazão provocava respingos no interior da estufa de germinação, o que poderia comprometer o funcionamento dos sensores de temperatura, umidade relativa e iluminância posicionados próximos ao substrato. Diante disso, optou-se por alimentar a bomba com 5 Vcc, reduzindo sua velocidade e proporcionando maior segurança para o ambiente interno da estufa.

O procedimento de medição da vazão consistiu em acionar a bomba continuamente para transferir água de um recipiente para outro com marcações de volume conhecidas, permitindo a observação direta do nível atingido. A cronometragem foi iniciada no momento do acionamento da bomba e encerrada ao alcançar exatamente 100 mL, conforme indicado na escala graduada do recipiente coletor. O volume foi coletado em 1 minuto e 15 segundos (75 s), permitindo o cálculo da vazão média, conforme a equação (8)

$$Q = \frac{100\text{mL}}{75\text{s}} \approx 1,33\text{mL/s} \quad (8)$$

sendo Q a vazão da bomba, em mililitros por segundo (mL/s). Convertendo para ml/min por meio da equação (9).

$$Q = 1,33 \times 60 = 80 \text{ mL/min} \quad (9)$$

A Figura 28 mostra o *setup* utilizado para realizar o experimento descrito.

Figura 28 – Calibração da irrigação.

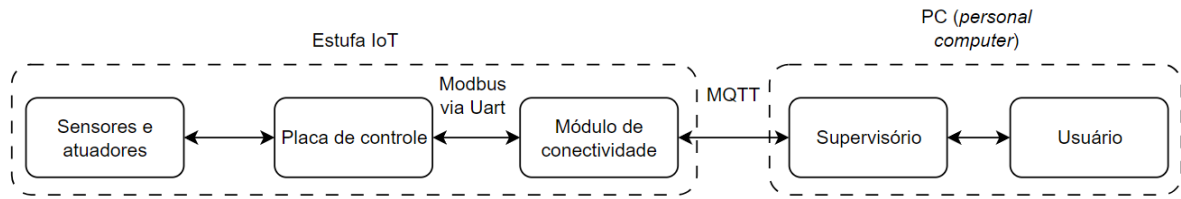


Fonte: Autor (2025).

4.3.2 Validação da comunicação entre os módulos e da arquitetura

Com o objetivo de validar a arquitetura proposta para o sistema automatizado de germinação, foram realizados testes específicos para verificar o funcionamento da cadeia de comunicação desde o módulo de controle até a interface supervisória. A Figura 29 apresenta uma versão simplificada do croqui conceitual elaborado no capítulo de hipóteses, porém em forma de diagrama.

Figura 29 – Diagrama conceitual simplificado.

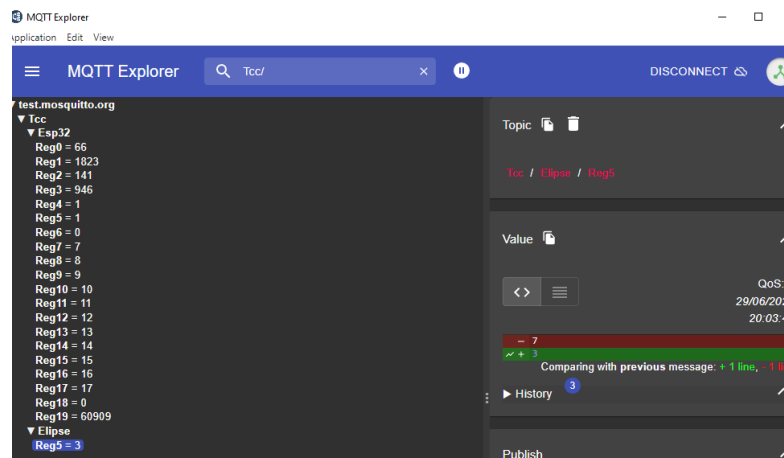


Fonte: Autor (2025).

Os testes foram planejados para garantir que as leituras dos sensores realizadas pela placa de controle fossem corretamente disponibilizadas ao usuário por meio da interface supervisória, e que os comandos emitidos por esta fossem recebidos e processados adequadamente pelos atuadores na prova de conceito.

Para isso, utilizou-se o *software* MQTT Explorer como cliente para inspeção direta dos tópicos publicados no *broker* público test.mosquitto.org. A visualização simultânea dos tópicos pertencentes às hierarquias Tcc/Esp32 e Tcc/Elipse permitiu confirmar que os dados eram trafegados corretamente entre o ESP32 (módulo de conectividade), o Node-RED e o Elipse E3. A Figura 30 mostra a interface do MQTT Explorer com os registros em tempo real, evidenciando a sincronização entre os módulos.

Figura 30 – MQTT Cliente para validação.

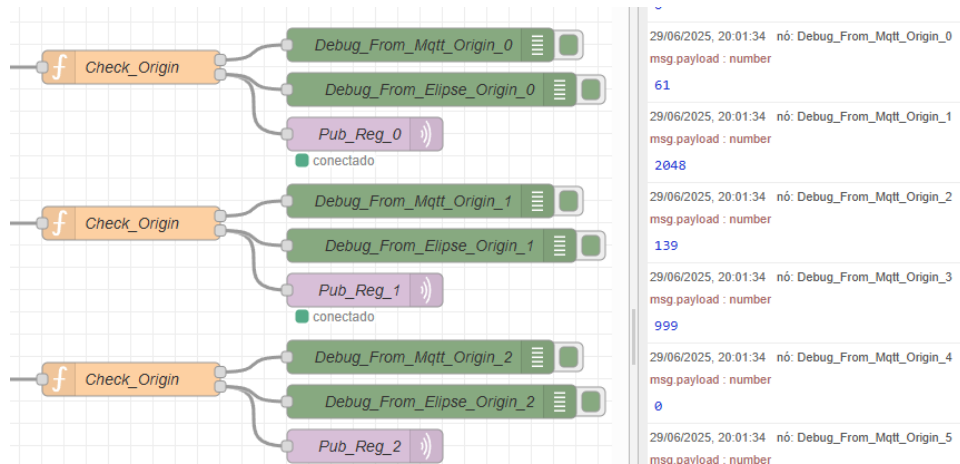


Fonte: Autor (2025).

No ambiente Node-RED, foi possível acompanhar o tratamento dos dados recebidos e enviados, por meio de um fluxo estruturado com blocos de leitura, identificação da origem da variável, lógica de verificação e publicação. As mensagens

de depuração demonstraram a correta identificação das TAGs originadas pelo ESP32 e pela interface Elipse E3, validando a lógica de prevenção de eco implementada no fluxo. A Figura 31 exibe a tela de desenvolvimento no Node-RED com as conexões ativas.

Figura 31 – Fluxo Node-RED ativo e debugando.



Fonte: Autor (2025).

Finalmente, a comunicação foi verificada no Elipse E3 Studio, por meio da tela de configuração do driver de comunicação. As TAGs de leitura exibiram valores consistentes com os dados capturados pelos sensores, demonstrando que a integração com o ambiente supervisorio foi bem-sucedida. A Figura 32 mostra os registros de valor, qualidade e *timestamp* capturados durante o teste.

Figura 32 – Driver de comunicação do E3 validado.

les (x86)\Elipse Software\Elipse E3\Projects\TCC\TCC_2\TCC_2.dom] (versão de demonstração) - [Driver1]

Nome	Disp...	Item	P1/N1/B1	P2/N2/B2	P3/N3/B3	P4/N4/B4	Taman...	Varredura	Valor	Qualidade	Estampa de tempo
Driver1			0	0	0	0					
Reg0		LUX	0	0	0	0		1000 9	60	192	29/06/2025 20:00:14,543
Reg1		HMDTY_SOIL	0	0	0	0		1000 9	2183	192	29/06/2025 20:00:14,832
Reg2		TEMPERATURE_AIR	0	0	0	0		1000 9	13,9	192	29/06/2025 19:59:39,878
Reg3		HMDTY_AIR	0	0	0	0		1000 9	99,9	192	29/06/2025 19:59:39,878
Reg4		STATUS_RELAYS	0	0	0	0		1000 9	0	192	29/06/2025 19:59:39,878
Reg5		CMD_RELAYS	0	0	0	0		1000 9	0	192	29/06/2025 19:59:39,878
Reg6			0	0	0	0		1000	Null	28	30/12/1899 00:00:00,000
Reg7			0	0	0	0		1000	Null	28	30/12/1899 00:00:00,000
Reg8			0	0	0	0		1000	Null	28	30/12/1899 00:00:00,000
Reg9			0	0	0	0		1000	Null	28	30/12/1899 00:00:00,000
Reg10			0	0	0	0		1000	Null	28	30/12/1899 00:00:00,000

Fonte: Autor (2025).

Esses testes confirmaram o funcionamento conjunto dos elementos que compõem a arquitetura, desde a coleta de dados até a disponibilização das informações ao usuário final, validando a proposta de monitoramento remoto em tempo real por meio de protocolos abertos e ferramentas acessíveis.

4.3.3 Validação do funcionamento geral do sistema

A última etapa de testes teve como objetivo verificar o funcionamento integrado da solução desenvolvida, validando a leitura dos sensores, o acionamento dos atuadores e a resposta do sistema às interações via supervisor. Este teste operacional é representado no fluxograma descrito anteriormente pela Figura 27, que ilustra o ciclo completo de funcionamento da aplicação: desde a energização até o monitoramento contínuo dos sensores e resposta a comandos remotos.

Com base na imagem apresentada pela Figura 33, observa-se o sistema em funcionamento sob comando remoto.

Figura 33 – Atuadores e sensores em operação.

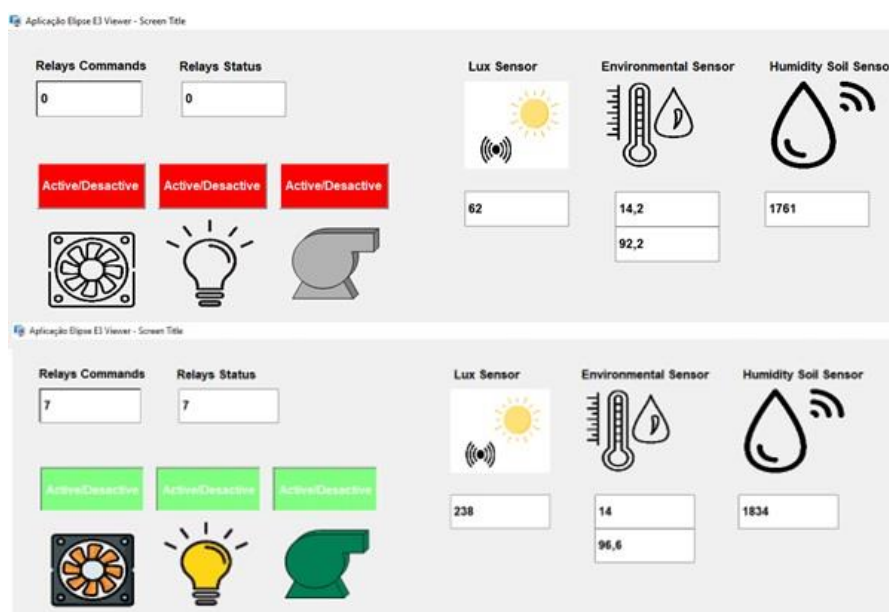


Fonte: Autor (2025).

A ativação dos três atuadores foi realizada com sucesso: a lâmpada *full spectrum* está ligada (emitindo luz visivelmente roxa), a bomba peristáltica em operação (com a mangueira liberando água sobre a espuma fenólica com mudas) e o exaustor acionado. No fundo da câmara é possível visualizar os sensores instalados e, na base, o sensor de umidade do solo inserido diretamente na espuma.

Já em relação a aplicação do SCADA desenvolvida no Elipse E3 (Figura 34), é possível visualizar claramente a resposta do sistema às mudanças.

Figura 34 – Tela do Elipse E3 em operação.



Fonte: Autor (2025).

Após a ativação dos comandos, a iluminância subiu de 62 para 238 lux, indicando o acionamento da lâmpada. A temperatura e umidade do ar permaneceram próximas dos valores esperados com base nas condições ambientais locais do momento que foram observadas (14 °C no SCADA versus 12 °C observados no termômetro e umidade relativa de 96,6% no SCADA frente a 92% registrados em serviços meteorológicos online). Já a leitura do sensor de umidade do substrato variou de 1761 para 1834 em escala de ADC, indicando aumento na umidade após o acionamento da bomba.

Essas observações, associadas à consistência das leituras e à resposta dos

atuadores ao comando remoto via SCADA, demonstram o funcionamento adequado da integração entre os módulos embarcados, o protocolo de comunicação Modbus, a interface MQTT, o *middleware* Node-RED e o supervisor Elipse E3.

Após a validação funcional do sistema, deu-se início à etapa de produção experimental, com o plantio de 72 sementes de alface na espuma fenólica posicionada dentro da câmara. A partir desse momento, foi mantido um regime de iluminação artificial de 12 horas diárias, com monitoramento contínuo das variáveis ambientais e de substrato. O sistema foi observado e comandado para manter a umidade do substrato em torno de 2000 unidades na escala de ADC, acionando a irrigação conforme necessário. O desenvolvimento das plântulas foi acompanhado ao longo dos dias, e os resultados obtidos durante esse acompanhamento são discutidos no capítulo seguinte, dedicado à análise e interpretação dos dados.

5 ANÁLISE

Esta seção apresenta a análise dos resultados obtidos ao longo do desenvolvimento deste trabalho, com foco na avaliação do desempenho do sistema automatizado proposto e na observação do comportamento das plântulas de alface sob as condições estabelecidas. A interpretação dos dados visa verificar se os objetivos definidos foram alcançados, considerando tanto os aspectos técnicos da automação quanto os indicadores biológicos do desenvolvimento das plantas. Os resultados são discutidos à luz das variáveis monitoradas, como temperatura, umidade, iluminância e umidade do substrato, e relacionados ao crescimento das plântulas durante o período de acompanhamento.

5.1 ANÁLISE DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Abordando a análise dos resultados obtidos durante a execução da prova de conceito em ambiente conduzido, com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema automatizado desenvolvido, a análise foi organizada em duas frentes principais: o funcionamento da solução embarcada e de supervisão, responsável pela medição e gerenciamento das variáveis ambientais, e a observação do comportamento das plântulas de alface ao longo do período de acompanhamento, realizado sob condições experimentais previamente estabelecidas.

5.1.1 Análise dos resultados da automatização

A automatização do ambiente experimental proposto demonstrou-se funcional ao longo do experimento, atuando de forma confiável na aquisição, processamento e resposta às variáveis de interesse previamente definidas: temperatura e umidade do ar interna, umidade do substrato e iluminância. O sistema foi mantido energizado desde o primeiro dia e operou com estabilidade, realizando leituras periódicas dos sensores e acionando os atuadores conforme os comandos recebidos via supervisor.

A validação dos sensores foi confirmada com base nas leituras apresentadas no SCADA e nas comparações com dispositivos externos de referência, revelando

variação aceitável, dado o baixo custo dos sensores, como 14 °C indicados pelo sensor interno frente a 12 °C em termômetro externo, e umidade relativa de 96,6% frente a 92% em dados obtidos de serviços meteorológicos. O sensor resistivo de umidade do solo mostrou resposta dinâmica compatível com as irrigações realizadas, exibindo variações coerentes nas leituras após o acionamento da bomba peristáltica.

Os comandos para ativação dos atuadores também se mostraram eficazes. O ventilador, a lâmpada LED e a bomba de irrigação foram todos acionados remotamente por meio do sistema SCADA ou diretamente via protocolo MQTT, o qual atua como intermediário entre o sistema supervisório e o microcontrolador de gerenciamento. Essa arquitetura permitiu que o comando dos atuadores fosse realizado mesmo sem a aplicação do supervisório Elipse E3 em execução.

Durante os testes, essa funcionalidade foi utilizada em situações reais, em que o autor acessou remotamente o sistema de outro local e foi capaz de acionar a iluminação com sucesso. A confirmação da execução do comando pôde ser verificada pela variação dos valores de iluminância registrados pelo sensor BH1750, que aumentavam valor de lux logo após o acionamento da lâmpada, indicando que o sistema respondeu corretamente ao comando enviado.

Esse resultado evidencia a robustez da arquitetura de comunicação adotada e reforça que, em aplicações futuras, o SCADA utilizado neste trabalho pode ser substituído por outras interfaces, como aplicativos móveis ou páginas web, sem prejuízo à funcionalidade do sistema. O uso do MQTT como camada de comunicação torna essa migração viável e flexível, promovendo maior acessibilidade e escalabilidade à solução proposta.

A arquitetura proposta, que integra a placa de controle ao módulo de conectividade ESP32, o protocolo Modbus RTU via UART e a comunicação MQTT com interface supervisória, demonstrou-se funcional e robusta para a finalidade experimental. O sistema manteve conectividade estável com o broker MQTT e permitiu a operação em tempo real, sem perda de pacotes ou falhas de atualização nas variáveis observadas.

Esses resultados validam a viabilidade do sistema automatizado como ferramenta de suporte ao cultivo protegido em escalas menores, reforçando seu potencial de replicação e aprimoramento em versões futuras, com ênfase na adição de controle baseado em regras e referências ou algoritmos de decisão.

5.1.2 Análise dos resultados do desenvolvimento das mudas

O acompanhamento do desenvolvimento das plântulas ao longo de 15 dias permitiu avaliar o desempenho do sistema automatizado no ambiente conduzido proposto. A Figura 35 apresenta o comparativo visual da evolução das plantas: à esquerda, a espuma fenólica no dia 1, com as sementes recém-posicionadas e a umidade inicial garantida pela primeira irrigação automatizada; à direita, o resultado ao final do período experimental, com as plântulas visivelmente desenvolvidas ao fim do processo.

Figura 35 – Comparativo do desenvolvimento das plantas.



Fonte: Autor (2025).

Entre os 72 pontos de cultivo disponíveis, foi registrada uma taxa de germinação de aproximadamente 97,22% (70 germinações bem-sucedidas). A média do número de folhas por plântula foi de cerca de duas folhas, e o comprimento médio das plântulas, medido por amostragem, ficou em torno de 40 mm. Embora esses valores tenham sido registrados, seu uso está limitado à função de apoio descritivo, servindo apenas como referência para reforçar as percepções qualitativas obtidas durante o experimento. A Tabela 1 apresenta essas informações de forma organizada, a fim de reunir as características gerais observadas no desenvolvimento inicial das plântulas.

Tabela 1 – Dados do desenvolvimento das plântulas

Parâmetro	Valor
Total de sementes semeadas (unidade)	72
Plantas germinadas (unidade)	70
Taxa de germinação (%)	97,22
Número médio de folhas (unidade)	2
Comprimento médio das plântulas (mm)	40

Fonte: Autor (2025).

Do ponto de vista qualitativo, foi observado que muitas das plântulas apresentaram sinais de estiolamento, como o alongamento excessivo do caule antes da emissão das folhas. Essa condição está comumente associada à baixa intensidade luminosa ou à distância inadequada entre a fonte de luz e as mudas. Conforme descreve Ferreira e Borghetti (2004, p. 240):

Em ambientes sombreados, plantas adaptadas à luz plena ativam predominantemente o fitocromo em sua forma inativa, o que leva a alterações fisiológicas como o alongamento do entrenó, redução da área foliar, menor emissão de ramificações e folhas com coloração verde-clara — caracterizando o estiolamento.

Apesar dessa limitação luminosa, o sistema foi capaz de sustentar o desenvolvimento inicial das mudas por meio da irrigação periódica e da manutenção térmica, assegurando condições mínimas para a germinação. A observação do estiolamento, no entanto, evidencia a importância de se estabelecer uma correlação mais precisa entre os valores de iluminância registrados pelos sensores e a quantidade efetiva de radiação fotossintética absorvida pelas plantas. Isso inclui a necessidade de ajustar variáveis como a altura da luminária em relação às plântulas e/ou a potência da fonte de luz utilizada, a fim de garantir níveis adequados de energia para o desenvolvimento vegetal durante a fase de germinação.

5.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE MELHORIAS FUTURAS

Embora o sistema desenvolvido tenha demonstrado funcionamento de acordo com o esperado durante os testes realizados, há diversas oportunidades de

aprimoramento que podem ser exploradas em trabalhos futuros. Uma das principais possibilidades consiste na implementação de uma automação mais robusta baseada em receitas pré-definidas, que permitiriam o controle dinâmico das variáveis ambientais conforme a fase de desenvolvimento das plântulas. Com isso, seria possível ajustar parâmetros como tempo de iluminação, frequência de irrigação e acionamento da ventilação de forma automatizada e personalizada para cada ciclo.

Outro ponto importante refere-se à substituição ou aprimoramento dos sensores utilizados. Apesar de terem se mostrado funcionais, muitos dos sensores empregados são de baixo custo e não possuem especificações técnicas detalhadas quanto à incerteza de medição. A adoção de sensores com certificações e curvas de calibração conhecidas aumentaria significativamente a confiabilidade dos dados obtidos e permitiria análises mais precisas.

No que diz respeito à supervisão remota, a utilização do SCADA com a ponte via MQTT apresentou resultados esperados. No entanto, para aplicações mais práticas e acessíveis, a substituição do sistema supervisório por uma interface mobile ou aplicação web poderia tornar a solução ainda mais portátil e adaptável a diferentes usuários. Por outro lado, caso o SCADA continue sendo utilizado, recomenda-se o uso mais completo de seus recursos nativos, como banco de dados histórico, sistema de alarmes e notificações, que poderiam alertar o usuário, por exemplo, sobre a falta de umidade no substrato ou falha na iluminação.

Essas melhorias visam aumentar a confiabilidade, usabilidade e escalabilidade do sistema, aproximando-o de aplicações reais no contexto de agricultura automatizada em pequena escala e sistemas indoor para germinação e produção de plantas.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de uma estufa automatizada indoor, capaz de criar um microambiente semicontrolado para a germinação e o desenvolvimento inicial de mudas de alface, com monitoramento e ajuste remoto de variáveis ambientais. Ao final da pesquisa, pode-se afirmar que esse objetivo foi alcançado por meio da construção e validação de um protótipo funcional que integrou sensores, atuadores e sistemas embarcados com conectividade via protocolo MQTT.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se as seguintes metas atingidas:

- foi realizado um levantamento técnico sobre as condições ideais para a germinação de hortaliças, orientando a definição dos parâmetros ambientais utilizados nos testes;
- a estrutura física da estufa foi projetada e construída em acrílico, com dimensões adequadas para acomodar as mudas e os componentes eletrônicos;
- foram selecionados e integrados sensores para monitoramento da temperatura, umidade relativa do ar, luminosidade e umidade do substrato;
- desenvolveu-se um sistema embarcado dividido em dois microcontroladores: um dedicado ao gerenciamento da câmara de cultivo e outro à conectividade;
- implementou-se a lógica de controle dos atuadores (irrigação, iluminação e ventilação), com programação em linguagem de baixo nível;
- foi integrada uma interface supervisória SCADA via Elipse E3, permitindo a visualização remota das variáveis e o envio de comandos;
- a interface web embarcada permitiu o acompanhamento em tempo real e o ajuste do sistema via rede sem fio;
- os dados observacionais foram documentados e analisados, destacando o desempenho do sistema e suas aplicações potenciais em contextos de agricultura urbana e produção doméstica.

Embora o sistema tenha desempenhado sua função, algumas limitações foram

identificadas, como a ocorrência de estiolamento em algumas plântulas, provavelmente em decorrência da intensidade ou posicionamento inadequado da fonte de luz. Ainda assim, a taxa de germinação, a estabilidade das variáveis ambientais e a eficácia da automação indicam o sucesso da proposta.

Por fim, este trabalho contribui com uma abordagem prática e didática para o uso de tecnologias embarcadas e conectividade em aplicações agrícolas indoor, reforçando o potencial de soluções acessíveis e adaptáveis para ambientes experimentais e educativos. Como discutido, há espaço para diversas melhorias futuras, especialmente no aprimoramento da automação, da qualidade sensorial e na interface com o usuário, aspectos que podem ser explorados em desenvolvimentos posteriores.

REFERÊNCIAS

- ALBIN PUMP. **How peristaltic pumps work. 2023.** Disponível em: <https://www.albinpump.com/en/news/how-peristaltic-pumps-work>. Acesso em: 4 jul. 2025.
- AOSONG. **AHT10 Integrated Temperature and Humidity Sensor.** Guangzhou: Aosong Electronics Co., Ltd., 2018. Disponível em: <https://altronics.cl/uploads/AHT10.pdf>. Acesso em: 4 jul. 2025.
- BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As plantas e o clima: princípios e aplicações.** Guaíba: Agrolivros, 2017. 352 p.
- DOUGLAS, James Sholto. **Hidroponia cultura sem terra.** São Paulo: Nobel, 2003. ISBN: 85-213-0468-4.
- ELIPSE SOFTWARE. **Utilizando o E3Studio em modo demo.** Elipse Knowledgebase, 2021. Disponível em: <https://kb.elipse.com.br/kb29583-utilizando-o-e3studio-em-modo-demo/>. Acesso em: 29 jun. 2025.
- EMBARCADOS. **Conheça a placa Blue Pill (STM32F103C8T6).** 09 mar. 2020. Disponível em: <https://embarcados.com.br/blue-pill-stm32f103c8t6/>. Acesso em: 21 jun. 2025.
- EMBARCADOS. **Introdução à placa ESP32-C6-DevKitC-1: ideal para IoT.** 18 jun. 2025. Disponível em: <https://embarcados.com.br/introducao-a-placa-esp32-c6-devkitc-1-ideal-para-iot/>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- EMBRAPA. **Espuma fenólica como substrato para produção de mudas.** Brasília: Embrapa Hortaliças, 2020. (Embrapa Hortaliças. Documento, 180). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1125796/1/DOC-180-18-set-2020.pdf>. Acesso em: 3 jul. 2025.
- FAO. **Como superar os desafios relacionados à água na agricultura. 2020.** Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/pt/c/1333398/>. Acesso em: 22 jul. 2022.
- FAO. **FAO comemora Dia Internacional de Conscientização sobre a Perda e o Desperdício de Alimentos com chamado à ação.** 30 set. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/en/c/1607352/>. Acesso em: 22 jul. 2025.
- FERREIRA, A. G.; BORGHETTI, F. **Germinação: do básico ao aplicado.** Porto Alegre: Artmed, 2004. 323 p. ISBN 85-363-0383-2.
- GREEN POWER. **Saiba como medir corretamente a condutividade elétrica do cultivo.** 29 maio 2020. Disponível em: <https://greenpower.net.br/blog/como-medir-corretamente-condutividade-eletrica/>. Acesso em: 17 jun. 2025.
- GREEN POWER. **Painel LED E27 75W Full Spectrum.** 2025. Disponível em:

<https://www.greenpowercultivo.net.br/iluminacao/painel-led-e27-75w-full-spectrum>. Acesso em: 23 jun. 2025.

GUIMARÃES, Gustavo Felipe; TAVARES, Larisse Caroline Santos. **Influência da luz de cultivo no desenvolvimento de mudas de alface**. Revista FT, v. 27, n. 129, p. –, dez. 2023. DOI: 10.5281/zenodo.10711255.

INTEGRAXOR. **SCADA System Architecture**. Disponível em: <https://www.integraxor.com/what-is-scada/scada-system-architecture/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 5807:1985 - Information processing — Documentation symbols and conventions for data, program and system flowcharts, program network charts and system resources charts**. Geneva: ISO, 1985.

JUNGLE LEAVES. **Lighting of houseplants**. Disponível em: <https://www.jungle-leaves.de/lighting-of-houseplants/?lang=en>. Acesso em: 23 jun. 2025.

LABHIDRO. **Hidroponia**. 2012. Disponível em: <https://labhidro.cca.ufsc.br/hidroponia-2>. Acesso em: 04 jul. 2025.

LIN, K. H. et al. **The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata)**. Scientia Horticulturae, v. 150, p. 86–91, 2013.

MCCREE, K. J. **The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants**. Agricultural and Forest Meteorology, v. 9, p. 191–216, 1972. DOI: [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(71\)90022-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(71)90022-7).

MEDEIROS, J. X. de et al. **Morfologia da germinação de sementes de Senna cana (Nees & Mart.) H.S. Irwin & Barneby**. Nativa, Sinop, v. 7, n. 6, p. 784–788, nov./dez. 2019. DOI: 10.31413/nativa.v7i6.8626.

METER GROUP. **Soil Moisture Sensors: How They Work & Why Some Are Not Research Grade**. 2023. Disponível em: <https://metergroup.com/br/measurement-insights/soil-moisture-sensors-how-they-work-why-some-are-not-research-grade/>. Acesso em: 4 jul. 2025.

MONK, S. **Comparing ADCs: ESP32, Raspberry Pi Pico and Arduino Uno**. 2024. Disponível em: <https://www.doctormonk.com/2024/01/comparingadcs.html>. Acesso em: 21 jun. 2025.

NASCIMENTO, W. M.; CANTLIFFE, D. J. **Germinação de sementes de alface sob altas temperaturas**. Horticultura Brasileira, v. 20, n. 1, p. 103–106, 2002.

NN DIGITAL. **Interfacing and Programming Light Sensor BH1750 Using Arduino**. 10 nov. 2019. Disponível em: <https://www.nn-digital.com/en/blog/2019/11/10/interfacing-programming-light-sensor-bh1750-using-arduino/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

OASIS. **MQTT Version 5.0**. OASIS Standard. 7 March 2019. Disponível em: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html>. Acesso em: 21 jun. 2025.

PAESSLER AG. **MQTT – Message Queuing Telemetry Transport**. Disponível em: <https://www.paessler.com/it-explained/mqtt>. Acesso em: 23 jun. 2025.

PANTHEON. **SCADA for Agriculture – Final Demo**. Deliverable D6.3. Horizon 2020 Project 774571. Roma Tre University, 2021. Disponível em: https://bartolo.dia.uniroma3.it/assets/final_demo/pantheon_scada_architecture_full.mp4. Acesso em: 3 jul. 2025.

ROHM SEMICONDUCTOR. **BH1750FVI – Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC**. Kyoto, Japão: Rohm Co., Ltd., nov. 2011. 17 p.

ROSA. **Guilherme Américo et al. Sistema de controle de temperatura e umidade para germinação de sementes**. Revista Caderno Pedagógico, Curitiba, v. 21, n. 12, p. 01–24, 2024. DOI: 10.54033/cadpedv21n12-189. Acesso em: 22 jul. 2025.

RT ENGINEERING. **The Ultimate Guide to Understanding and Implementing SCADA Systems**. 2023. Disponível em: <https://www.rteng.com/blog/understanding-and-implementing-scada-systems>. Acesso em: 21 jun. 2025.

SEYAR, M. A.; AHAMED, F. **Development of an IoT-Based Precision Irrigation System for Tomato Production from Indoor Seedling Germination to Outdoor Field Production**. Agriculture, v. 13, n. 5, p. 1045, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture13051045>.

SHARMA, N.; ACHARYA, S.; SINGH, N.; KUMAR, K.; SINGH, R.; KULKARNI, M. **Hydroponics as an advanced technique for vegetable production: An overview**. Journal of Soil and Water Conservation, v. 17, n. 4, p. 364–371, 2018.

STANFORD-CLARK, A.; NIPPER, A. **MQTT – The Standard for IoT Messaging**. IBM Developer, 2018. Disponível em: <https://developer.ibm.com/articles/iot-mqtt-why-good-for-iot/>. Acesso em: 21 jun. 2025.

TROPICAL ESTUFAS. **Tipos de hidroponia: NFT**. Disponível em: <https://tropicalestufas.com.br/tipos-de-hidroponia-nft/>. Acesso em: 23 jun. 2025.

VAZ, C. M. P. et al. **Evaluation of Standard Calibration Functions for Eight Electromagnetic Soil Moisture Sensors**. Vadose Zone Journal, v. 12, 2013. doi:10.2136/vzj2012.0160

WAVEFORM LIGHTING. **What are full spectrum LED grow lights?** Disponível em: <https://www.waveformlighting.com/horticulture/what-are-full-spectrum-led-grow-lights>. Acesso em: 25 jun. 2025.