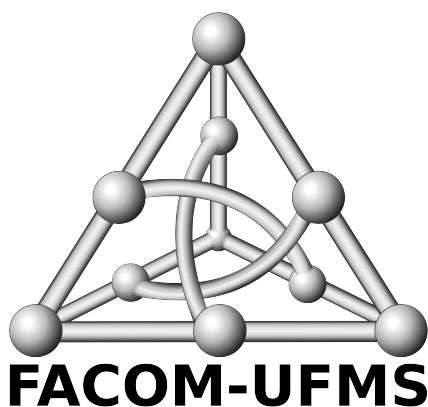

Sistema Automático de Monitoramento e Atuação para Produção Hidropônica

FACOM
Faculdade de Computação
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



Luiz Gustavo S. S. Junqueira, Camila C. Cáceres

Orientadora: Hana Karina Salles Rubinsztejn

Trabalho de Conclusão de Curso.

Novembro de 2025

Abstract

Environmental impacts resulting from climate change represent one of the greatest challenges faced by contemporary society. Agriculture, an activity highly vulnerable to climatic variations, is directly affected by soil degradation, water scarcity, and the effects of global warming. In this context, hydroponics emerges as a sustainable alternative, enabling soilless cultivation and more efficient use of water and nutrients. The integration of hydroponics with the Internet of Things (IoT) can enhance automation and control over cultivation conditions, contributing to the sustainability and economic viability of agricultural production. This work proposes the development of an automatic monitoring and actuation system for hydroponic cultivation based on the NFT (Nutrient Film Technique) method. The system uses ESP32 microcontrollers, low-cost sensors, and the MQTT protocol for communication. The proposal aims to democratize access to sustainable cultivation technologies suitable for both small and large-scale producers.

Resumo

Os impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas representam um dos maiores desafios da sociedade contemporânea. A agricultura, atividade altamente vulnerável às variações climáticas, sofre diretamente com a degradação do solo, a escassez de água e os efeitos do aquecimento global. Nesse contexto, a hidroponia surge como uma alternativa sustentável, permitindo o cultivo sem solo e com uso mais eficiente de recursos, água e nutrientes. A integração da hidroponia com a Internet das Coisas (IoT) pode aprimorar a automação e o controle das condições de cultivo, contribuindo para a sustentabilidade e a viabilidade econômica da produção agrícola. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automático de monitoramento e atuação para o cultivo hidropônico baseado na técnica NFT (*Nutrient Film Technique*). O sistema utiliza microcontroladores ESP32, sensores de baixo custo e o protocolo MQTT para comunicação. A proposta visa democratizar o acesso a tecnologias de cultivo sustentável, adequadas tanto para pequenos quanto para grandes produtores.

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADC	<i>Analog-to-Digital Converter</i> (Conversor Analógico-Digital)
ANFIS	<i>Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
DC	<i>Direct Current</i> (Corrente Contínua)
DHT22	<i>Digital Humidity and Temperature sensor</i>
DWC	<i>Deep Water Culture</i> (Cultura em Água Profunda)
EC	<i>Electrical Conductivity</i> (Condutividade Elétrica)
ESP32	Microcontrolador com Wi-Fi/Bluetooth integrado
HTTP	<i>HyperText Transfer Protocol</i>
HTTPS	<i>HyperText Transfer Protocol Secure</i>
IoT	<i>Internet of Things</i> (Internet das Coisas)
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LED	<i>Light Emitting Diode</i>
LoRaWAN	<i>Long Range Wide Area Network</i>
MAC	<i>Media Access Control</i> (Endereço físico de rede)
MQTT	<i>Message Queuing Telemetry Transport</i>
NFT	<i>Nutrient Film Technique</i> (Técnica de Filme Nutritivo)
pH	Potencial Hidrogeniônico
RAM	<i>Random Access Memory</i>
REST	<i>Representational State Transfer</i>
RSL	Revisão Sistemática da Literatura
SLF	<i>Soilless Farming</i> (Agricultura sem Solo)
SoC	<i>System on Chip</i>
TDS	<i>Total Dissolved Solids</i> (Sólidos Totais Dissolvidos)
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>

Sumário

Lista de Siglas	3
1 Introdução	6
2 Trabalhos Relacionados	10
2.1 Considerações finais	14
3 Metodologia	15
3.1 Sistemas de Controle	16
3.1.1 Sistema de Controle Geral	17
3.1.2 Sistema de Controle do Reservatório	18
3.1.3 Sistema de Controle da Bancada	18
3.2 Componentes Eletrônicos	19
3.2.1 Microcontrolador	19
3.2.2 Sensores	20
3.2.3 Atuadores	23
3.3 Implementação de Hardware	23
3.4 Comunicação MQTT	26

3.5	Aplicação Web	30
3.5.1	Considerações de Implementação	34
4	Resultados	36
4.1	Testes Individuais de Sensores	36
4.2	Teste dos Sensores em Conjunto	38
4.3	Registro de Teste em Sistema Real	39
4.4	Considerações sobre os Resultados	42
5	Conclusão	43
6	Referências Bibliográficas	46
A	Revisão Sistemática da Literatura	51
B	Custo dos Componentes	54
C	Estimativa de Custo Energético	56

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), os impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas representam um dos maiores desafios da sociedade contemporânea. Esses efeitos têm se refletido diretamente no cotidiano das pessoas, afetando desde a disponibilidade de recursos naturais e a produtividade agrícola até o equilíbrio ambiental. Diante desse cenário, conferências globais, como a Conferência das Partes (COP 30), reforçam a necessidade urgente de desenvolver soluções tecnológicas e sustentáveis capazes de mitigar tais impactos e promover a adaptação às novas condições climáticas.

Observando o cenário atual da agricultura, nota-se que ainda predomina o cultivo em solo. Como afirma Lakhiar et al. [1], “dos aproximadamente 1,6 bilhões de hectares de terras agrícolas no mundo, apenas cerca de 95 mil hectares estão sob sistemas SLF¹, correspondendo a apenas 3,5% da produção agrícola total”. Esse modelo de cultivo é fortemente afetado pelas variações climáticas, uma vez que depende diretamente dos nutrientes presentes e da qualidade do solo.

Em complemento, segundo Pomoni *et al.*[2], o setor agrícola é responsável por aproximadamente 50% das emissões globais de óxido nitroso (N_2O) e 60% das emissões de metano (CH_4), sendo o solo uma das principais fontes desses gases. Além disso, avanço das fronteiras agrícolas e a intensificação do cultivo resultam em perda de biodiversidade, erosão do solo e contaminação de recursos hídricos, contribuindo ainda mais para a instabilidade climática

¹Soilless Farming (SLF)

e ambiental.

Segundo projeções da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), a população mundial deverá atingir 9,7 bilhões de pessoas até 2050, demandando um aumento de 60% na produção global de alimentos. Concomitantemente, a urbanização acelerada reduz as áreas agricultáveis disponíveis, enquanto aproximadamente 11% da população mundial ainda enfrenta situação de subnutrição [3]. Diante desse cenário, torna-se imperativa a adoção de sistemas de cultivo mais eficientes e que ocupem menos espaço físico.

Uma alternativa promissora é a agricultura sem solo, em que os nutrientes e condições ideais para o desenvolvimento das culturas são controlados e distribuídos por meio da água e do ar. Nesse contexto, a hidroponia destaca-se como uma solução sustentável, apresentando elevada eficiência no uso de recursos. Estudos indicam que sistemas hidropônicos podem reduzir o consumo de água em até 90% em comparação com métodos convencionais de cultivo em solo [3, 4], o que se torna especialmente relevante frente à crescente escassez hídrica global.

Segundo Jensen [5], a hidroponia é um sistema de produção agrícola no qual o desenvolvimento das plantas ocorre por meio de soluções nutritivas balanceadas, dispensando o uso do solo natural. Este método pode empregar meios de sustentação artificial, tais como substratos inertes, para proporcionar ancoragem física ao sistema radicular. Além disso, classifica os sistemas hidropônicos em dois tipos principais quanto ao manejo da solução nutritiva: o sistema aberto, no qual a solução é aplicada às plantas e não retornam ao reservatório, sendo descartada após o uso; e o sistema fechado, onde a solução é recirculada, sendo bombeada até as plantas e retornando ao reservatório por gravidade, permitindo seu reaproveitamento.

Entre os principais sistemas hidropônicos, destacam-se a Técnica do Filme Nutritivo (NFT - *Nutrient Film Technique*), a Cultura em Água Profunda (DWC - *Deep Water Culture*) e a aeroponia. No sistema NFT, as raízes permanecem em contato com uma fina película de solução nutritiva em circulação constante; na DWC, as raízes ficam submersas em solução oxigenada por bombas de ar; e, na aeroponia, as raízes ficam suspensas no ar recebendo a solução na forma de névoa [4]. Neste trabalho, adotou-se o sistema NFT, caracterizado por ser fechado que permite a recirculação eficiente da solução nutritiva, proporcionando alta absorção de nutrientes pelas raízes.

O sistema NFT foi desenvolvido na década de 1960 pelo Dr. Allen Cooper, na Inglaterra, com o objetivo de superar as limitações dos sistemas anteriores [3]. Esse método é particularmente indicado para cultivos de ciclo curto, como hortaliças folhosas, pois apresenta elevada produtividade por unidade de área e permite produção contínua ao longo do ano, independente das condições climáticas externas.

Paralelamente aos avanços em sistemas de cultivo sustentável, a Internet das Coisas (IoT - *Internet of Things*) tem se consolidado como uma tecnologia transformadora em diversos setores. O termo IoT refere-se à extensão da conectividade de rede e da capacidade computacional a objetos, sensores e dispositivos do cotidiano que, tradicionalmente, não são considerados computadores. Esses dispositivos passam a gerar, trocar e consumir dados — seja para monitoramento, seja para tomada de decisões — com mínima intervenção humana. A convergência de tendências tecnológicas como conectividade universal, adoção de redes baseadas em IP, miniaturização de componentes e avanços em análise de dados tem tornado a IoT cada vez mais viável e acessível [6].

A integração entre sistemas hidropônicos e IoT representa uma sinergia particularmente promissora para a agricultura moderna. Enquanto a hidroponia elimina as variabilidades inerentes ao cultivo em solo e permite o controle preciso sobre a nutrição das plantas, a IoT fornece os meios tecnológicos para automatizar esse controle e expandir sua escala de aplicação. Sistemas hidropônicos equipados com sensores de pH, condutividade elétrica, temperatura, umidade e nível da solução nutritiva, conectados por meio de redes de comunicação sem fio, podem operar de forma autônoma, ajustando continuamente as condições de cultivo com base em dados coletados em tempo real [7].

Essa integração reduz significativamente a necessidade de intervenção manual, otimiza o consumo de recursos hídricos e energéticos e possibilita a coleta de grandes volumes de dados, que podem ser analisados para a otimização contínua do sistema produtivo. Como resultado, contribui para práticas agrícolas mais sustentáveis e alinhadas aos princípios da agricultura de precisão.

Diante desse contexto e das potencialidades oferecidas pela integração entre hidroponia e IoT, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automático de monitoramento e atuação para produção hidropônica baseado na técnica NFT.

O sistema desenvolvido busca combinar eficiência produtiva, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, caracterizando-se por uma arquitetura modular e escalável de baixo custo, adequada tanto para pequenos produtores quanto para operações de maior porte. Para isso, realiza o monitoramento contínuo de parâmetros críticos da solução nutritiva (isto é, pH, condutividade elétrica e temperatura) e do ambiente de cultivo (temperatura e umidade do ar), bem como o controle automatizado da circulação da solução e da iluminação artificial das bancadas.

A implementação utiliza microcontroladores ESP32, sensores de baixo custo e o protocolo MQTT para comunicação, sendo organizada em três níveis de sistema de controle: geral, reservatório e bancada. O sistema foi validado em ambiente real com cultivo de alface crespa *indoor*, demonstrando viabilidade técnica e econômica. A seleção de componentes de baixo custo visa democratizar o acesso à tecnologia de cultivo hidropônico automatizado, tornando-a viável tanto para pequenos produtores urbanos quanto para operações comerciais em larga escala, contribuindo para a produção sustentável de alimentos com uso otimizado de recursos.

Por fim, este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta os trabalhos relacionados; o Capítulo 3 descreve a metodologia e a implementação do sistema; o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos; e o Capítulo 5 conclui o estudo.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

A fim de identificar tendências, lacunas e padrões tecnológicos em sistemas hidropônicos automatizados, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL). O levantamento bibliográfico seguiu etapas estruturadas de busca, triagem e seleção, descritas detalhadamente no Apêndice A.

Como síntese inicial, a Tabela 2.1 apresenta um resumo do processo de busca, indicando as bases consultadas, o número de artigos encontrados, os excluídos e o total de trabalhos selecionados para a análise.

Tabela 2.1: Resumo do processo de seleção da RSL.

Base	Encontrados	Excluídos	Selecionados
Scopus	271	208	11
IEEE Digital Library	98	63	10
ACM Digital Library	8	7	0

A partir desta revisão, pode-se observar que os trabalhos recentes sobre sistemas hidropônicos automatizados apresentam padrões recorrentes em termos de arquitetura e tecnologias empregadas. A análise de 21 trabalhos relevantes [8–28] revela similaridades significativas nas escolhas de sensores, plataformas de controle e protocolos de comunicação adotados.

A comparação entre os artigos foi estruturada em três eixos principais:

1. Sensores utilizados para o monitoramento da solução nutritiva e do ambiente de cultivo;

2. Atuadores empregados, como bombas, válvulas e sistemas de iluminação
3. Plataformas de controle e tecnologias de comunicação, incluindo microcontroladores, protocolos e arquiteturas de sistema.

A maioria dos sistemas analisados emprega a técnica NFT, geralmente implementada em pequena escala e direcionada ao cultivo de alface, utilizada como cultura de teste. Esta predominância da técnica NFT pode ser explicada por sua relativa simplicidade de implementação, baixo custo inicial e adequação da técnica paratécnica para culturas folhosas de ciclo rápido, como a alface, tornando-se a escolha preferencial para prototipagem e validação de sistemas IoT aplicados à agricultura urbana.

No que se refere ao monitoramento, observa-se um conjunto de parâmetros amplamente utilizado. O pH da solução nutritiva aparece em 20 dos 21 trabalhos analisados, evidenciando sua importância para a qualidade do cultivo. Em seguida, temperatura da água, temperatura do ar, umidade do ar e condutividade elétrica compõem o conjunto mínimo de sensores presentes na grande maioria das implementações. Esta uniformidade reflete o conhecimento consolidado sobre os fatores críticos para o sucesso de cultivos em sistemas hidropônicos, onde o pH inadequado pode impedir a absorção de nutrientes, mesmo quando estes estão presentes em quantidades adequadas.

As plataformas de controle utilizadas também revelam tendências claras: o ESP32 aparece em 15 trabalhos, seguido por Arduino e Raspberry Pi, sendo comum o uso combinado dessas plataformas. A popularidade do ESP32 deve-se à integração nativa com WiFi, ao baixo custo e ao reduzido consumo energético, características fundamentais para aplicações IoT.

O Arduino mantém relevância por sua compatibilidade com sensores que atuam em 5V, embora seja possível utilizá-los com o ESP32 sem grandes modificações. Por sua vez, o Raspberry Pi é empregado em aplicações que exigem maior poder computacional, como sistemas baseados em imagens ou algoritmos de controle avançados. Surantha e Vincento [22] ilustram essa abordagem ao utilizarem Raspberry Pi para implementar lógica fuzzy adaptativa (ANFIS) no controle de pH e condutividade elétrica, obtendo maior precisão e estabilidade.

Quanto aos atuadores, o acionamento de bombas para controle do fluxo de água é a solução mais comum, seguido pelo controle de iluminação artificial, refletindo a necessidade de circulação adequada da solução nutritiva

e suplementação luminosa em ambientes fechados ou com pouca iluminação natural.

Em menor escala, alguns trabalhos realizam também o controle da aplicação de nutrientes na solução, permitindo ajustes dinâmicos de pH, condutividade elétrica e temperatura.

A análise das arquiteturas de comunicação revela forte uniformidade: 18 dos 21 trabalhos utilizam comunicação sem fio. Quanto aos protocolos de comunicação, o protocolo HTTP/HTTPS lidera com 17 implementações, seguido por MQTT com 8 ocorrências, frequentemente utilizados de forma complementar no mesmo sistema. O WiFi é a tecnologia de comunicação predominante, devido à facilidade de implementação e à adequação para ambientes indoor, onde a maioria dos sistemas hidropônicos de pequena escala opera. Já tecnologias mais específicas como LoRa e Zigbee, aparecem em contextos onde maior alcance é necessário, geralmente em implementações outdoor ou em instalações comerciais de maior porte.

Nguyen et al. [10] exemplificam essa diversidade ao combinarem ZigBee para comunicação entre sensores e gateway, WiFi para acesso à nuvem e MQTT para integração com o servidor web, demonstrando a viabilidade de protocolos mesh em sistemas de escala média.

A predominância de HTTP/HTTPS sobre MQTT pode ser explicada pela maior familiaridade dos desenvolvedores com APIs REST e pela infraestrutura web já estabelecida, embora MQTT ofereça vantagens em termos de eficiência energética e adequação ao paradigma *publish-subscribe* típico de aplicações IoT.

Uma visão consolidada das características técnicas identificadas nos trabalhos analisados é apresentada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Comparação dos trabalhos relacionados quanto à técnica, sensores, plataformas e comunicação.

Trabalho	Técnica	Sensores	Plataforma	Protocolo	Contr. Nutr.	Escala
Mendon et al. [8]	NFT	EC, Fluxo, pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP	HTTP/HTTPS, MQTT	Não	Pequeno
Narayanan et al. [9]	NFT	pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar, Turbidez	Arduino, ESP	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Nguyen et al. [10]	NFT	EC, Lum., pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP	HTTP/HTTPS, MQTT (I2C, WiFi, ZigBee)	Não	Médio
Fitria et al. [11]	–	EC, Lum., pH, Temp. ar, Umid. ar	Arduino	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Gourshettiwar et al. [12]	–	Lum., pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	Arduino, Raspberry Pi	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Helmy et al. [13]	NFT	pH	Arduino, ESP	HTTP/HTTPS	Sim	Pequeno
Ibarra et al. [14]	NFT	pH, Temp. água	Arduino, Raspberry Pi	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Jain et al. [15]	NFT	EC, Lum., pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP	HTTP/HTTPS, MQTT	Não	Pequeno
Joshitha et al. [16]	NFT	pH, Temp. ar, Umid. ar	ESP	–	Não	Pequeno
Kulkarni et al. [17]	NFT	EC, Fluxo, pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP	MQTT	Não	Pequeno
Lakshmanan et al. [18]	NFT	Fluxo, Lum., pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP, Raspberry Pi	MQTT	Não	Pequeno
Pramono et al. [19]	DFT	EC, pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	Arduino, ESP	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Rathod et al. [20]	Ebb and Flow	EC, pH, Temp. água	Arduino	LoRa	Não	Pequeno
Shin et al. [21]	Ebb and Flow	EC, pH, Temp. água	ESP	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Surantha e Vincento [22]	NFT	EC, pH	Arduino, Raspberry Pi	HTTP/HTTPS	Sim (ANFIS)	Pequeno
Tan et al. [23]	NFT	CO2, EC, pH, Temp. água	Arduino, Raspberry Pi	HTTP/HTTPS, MQTT	Não	Pequeno
Tolentino et al. [24]	NFT	EC, Lum., pH, Temp. água, Temp. ar	Arduino, ESP	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Venkatraman et al. [25]	NFT	Fluxo, Lum., pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	Arduino, ESP, Raspberry Pi	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Zaid et al. [26]	NFT	EC, pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP	HTTP/HTTPS	Não	Pequeno
Annie et al. [27]	–	Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP	HTTP/HTTPS, MQTT	Não	Pequeno
Samadder et al. [28]	NFT	EC, pH, Temp. água, Temp. ar, Umid. ar	ESP	HTTP/HTTPS, MQTT	Não	Pequeno
Sistema proposto	NFT	pH, EC, Temp., Umid., Fluxo, Nível	ESP32	MQTT	Sim (parcial)	Escalável

2.1 Considerações finais

O sistema proposto neste trabalho compartilha com os trabalhos analisados a escolha pela técnica NFT, o uso de WiFi como tecnologia de comunicação e de MQTT como protocolo preferencial, além do monitoramento dos parâmetros essenciais – pH, temperatura da água, condutividade elétrica, temperatura e umidade do ar – e controle de fluxo de água e luminosidade. No entanto, diferencia-se principalmente por sua arquitetura modular e escalável, projetada para atender demandas tanto em pequena quanto em grande escala.

Enquanto a maioria dos trabalhos revisados concentra-se em implementações de pequena escala com arquitetura monolítica, o sistema desenvolvido adota uma estrutura hierárquica em três níveis, possibilitando expansão horizontal com múltiplas bancadas de produção e integração vertical de diversas estufas em um único sistema de controle geral. A utilização do microcontrolador ESP32 em todos os módulos, ao invés da combinação Arduino/ESP proporciona maior poder de processamento, conectividade nativa e padronização no desenvolvimento.

Adicionalmente, o projeto implementa sensores de fluxo de água distribuídos por bancada para monitoramento individual da circulação e sensores capacitivos sem contato para medição de nível do reservatório, que são aspectos pouco explorados nos trabalhos revisados.

Esta abordagem modular e distribuída visa preencher a lacuna identificada na literatura entre sistemas experimentais de pequena escala e as necessidades operacionais de produções hidropônicas em maior escala.

Capítulo 3

Metodologia

O sistema NFT, utilizado nesse trabalho, é comumente implementado por meio de bancadas elevadas com calhas inclinadas que permitem o melhor escoamento da solução nutritiva sobre as raízes das plantas, como ilustrado na Figura 3.1.

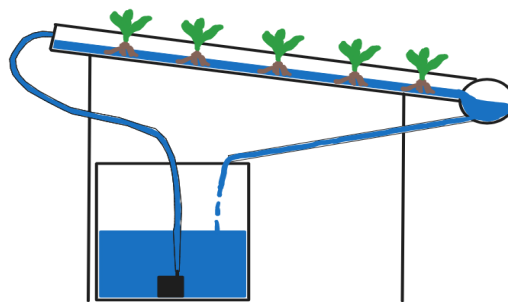


Figura 3.1: Sistema NFT.

O sistema de monitoramento proposto é composto por três componentes principais, ilustrados na Figura 3.2:

- Sistema de controle geral;
- Sistema de controle do reservatório;
- Sistema de controle da bancada.

Os componentes da arquitetura incluem sensores, atuadores, micro-controladores e uma aplicação web, responsáveis pelo monitoramento das variáveis de cultivo e pela configuração do sistema.

A arquitetura foi projetada de forma modular e escalável, permitindo expansão conforme a escala da produção: é possível adicionar múltiplos sistemas de controle de bancadas em uma mesma estufa e integrar diversas estufas sob um único sistema de controle geral. Essa abordagem facilita a adaptação do sistema a estruturas maiores e mais complexas.

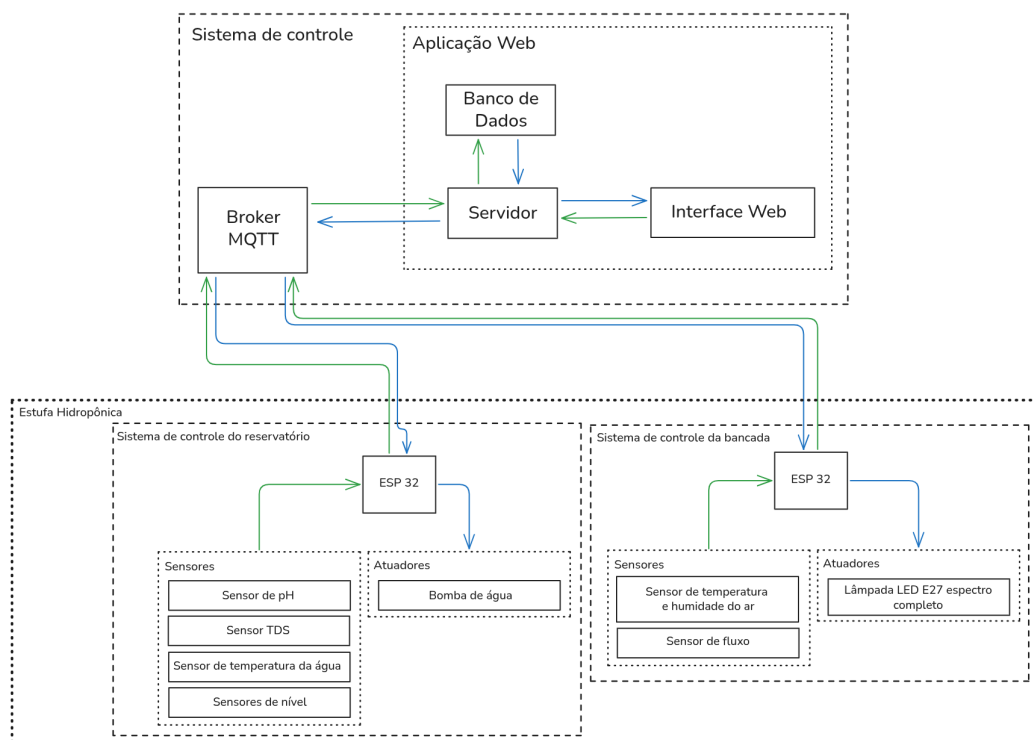


Figura 3.2: Diagrama do sistema de controle.

3.1 Sistemas de Controle

A seguir, detalham-se as funcionalidades e responsabilidades de cada um dos três sistemas de controle mencionados anteriormente.

3.1.1 Sistema de Controle Geral

O sistema de controle geral atua como o núcleo de coordenação, hospedando o *broker* MQTT responsável pela comunicação entre todos os componentes do sistema.

Além do *broker*, o sistema executa uma aplicação web que permite analisar os dados coletados pelos sensores, configurar os parâmetros ideais da solução nutritiva conforme a espécie cultivada e acionar manualmente os atuadores quando necessário.

Durante a implementação, o *broker* MQTT foi configurado utilizando o software Eclipse Mosquitto, operando com o protocolo MQTT v5, executado como contêiner Docker hospedado em um Raspberry Pi 3B+. Essa abordagem facilitou a implantação e o gerenciamento do serviço, garantindo isolamento do ambiente e simplificando futuras atualizações. O Raspberry Pi apresentou desempenho satisfatório no gerenciamento da comunicação entre os módulos de controle, devido ao baixo consumo energético e à conectividade integrada.

No entanto, devido à limitação de memória RAM (1 GB), o Raspberry Pi não se mostrou capaz de executar de forma estável o banco de dados e a aplicação web simultaneamente ao *broker*. Por esse motivo, a aplicação web e o banco de dados foram hospedados em um computador separado, com maior capacidade de processamento e memória, assegurando a estabilidade da interface e do armazenamento histórico de dados.

Estima-se que modelos mais recentes do Raspberry Pi, com 4 GB de RAM ou mais, sejam capazes de executar todos os serviços do sistema de controle geral em um único dispositivo sem prejuízo de desempenho, considerando o consumo de memória observado durante os testes, que ultrapassou a capacidade de 1 GB do Raspberry 3B+, mas se manteve dentro do limite atendido por dispositivos com 4 GB.

O código-fonte da aplicação web e dos firmwares do sistema do reservatório e da bancada está disponível no GitHub¹.

¹<https://github.com/camilacaceres1d/Sistema-de-Monitoramento-e-Atuacao-Automatico-para-Producao-Hidroponica>

3.1.2 Sistema de Controle do Reservatório

Este componente monitora os parâmetros da solução nutritiva no reservatório e controla a bomba responsável pela circulação da solução no sistema hidropônico.

Para isso, são utilizados os seguintes componentes:

- Microcontrolador ESP32;
- Sensor capacitivo de nível sem contato (XKC-Y25-V);
- Sensor de sólidos totais dissolvidos (TDS Meter V1.0);
- Sensor de pH analógico (PH4502C + eletrodo BNC);
- Sensor de temperatura digital (DS18B20);
- Bomba submersa 600 L/h (PL-202).

O ESP32 realiza a leitura dos dados dos sensores e os publica em tópicos no *broker* MQTT, possibilitando o processamento e visualização na aplicação web.

3.1.3 Sistema de Controle da Bancada

O sistema de controle da bancada realiza o monitoramento individual de cada bancada, medindo o fluxo de água, a temperatura e a umidade do ar do ambiente. Além disso, controla a iluminação artificial, ajustando os ciclos de luz para otimizar o crescimento das plantas. Esse módulo foi projetado para operar em uma única bancada, podendo ser replicado conforme o número de bancadas da produção.

Para isso, são utilizados os seguintes componentes eletrônicos:

- Micro-controlador ESP32;
- Sensor de temperatura e umidade do ar (DHT22);
- Sensor de fluxo de água (YF-S201);

- Lâmpada LED E27 espectro completo.

Assim como no sistema do reservatório, o ESP32 lê os dados dos sensores e os publica em tópicos MQTT, permitindo que a aplicação os processe e apresente ao usuário.

3.2 Componentes Eletrônicos

O sistema utiliza diversos componentes eletrônicos para o monitoramento e o controle dos parâmetros essenciais à produção hidropônica eficiente. A seleção dos dispositivos considerou fatores como precisão das medições, relação custo-benefício e facilidade de integração com o sistema.

Nesta seção, os componentes são apresentados de acordo com sua função no sistema: inicialmente é apresentado o microcontrolador utilizado nos sistemas de bancada e de reservatório; em seguida, são descritos os sensores utilizados para monitoramento da solução nutritiva e das condições ambientais; por fim, são apresentados os atuadores responsáveis pela circulação da solução e pela iluminação das plantas.

3.2.1 Microcontrolador

A placa de desenvolvimento usada para os sistemas é a **MH-ET LIVE ESP32 MiniKit**, escolhida por sua praticidade na integração visto que expõe de forma mais acessível as funcionalidades do chip ESP32-WROOM-32. Além disso, o número de portas digitais e analógicas disponíveis atende às demandas do projeto, permitindo a conexão simultânea de todos os sensores e atuadores utilizados sem necessidade de outros componentes para essa comunicação.

O núcleo da placa é o microcontrolador **ESP32-WROOM-32**, desenvolvido pela Espressif Systems. Trata-se de um SoC (*System on Chip*) que integra conectividade Wi-Fi e Bluetooth em um único chip, possuindo dois núcleos Xtensa LX6 de até 240 MHz, 520 KB de memória SRAM e suporte a até 4 MB de memória flash externa, possibilitando aplicações que exigem multitarefa. O ESP32 disponibiliza ainda conversores ADC e DAC, sensores internos e suporte a diversas interfaces de comunicação (I2C, SPI, UART),

fundamentais para integração com os sensores e atuadores utilizados neste projeto.

3.2.2 Sensores

O sensor de temperatura **DS18B20** é um sensor digital à prova d'água utilizado para monitorar a temperatura da solução nutritiva. Este sensor foi escolhido por sua precisão de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ na faixa de -10°C a $+85^\circ\text{C}$, o que está dentro da faixa de funcionamento de um sistema hidropônico. Outra vantagem desse sensor é a utilização do protocolo *One-Wire* para comunicação, que permite a conexão de múltiplos sensores em uma única porta digital do microcontrolador.

O sensor **TDS Meter V1.0** mede a concentração de sólidos dissolvidos totais (*Total Dissolved Solids* - TDS) na solução nutritiva. Ele é composto por uma sonda com dois eletrodos, que fica submersa na água, e um módulo de processamento analógico, que mede a condutividade elétrica (EC) da água.

O microcontrolador faz a leitura de EC do módulo por meio de uma porta com conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits, seguindo as seguintes etapas:

1. Leitura analógica do ADC:

$$V_{\text{medido}} = \frac{\text{ADC}_{\text{mediana}} \cdot V_{\text{ref}}}{4095}$$

onde $\text{ADC}_{\text{mediana}}$ é o valor mediano de 30 leituras consecutivas e V_{ref} é a tensão de referência do microcontrolador (3.3V para o ESP32).

2. Compensação de temperatura:

$$V = \frac{V_{\text{medido}}}{1 + 0.02 \cdot (T - 25)}$$

com T em $^\circ\text{C}$.

3. Conversão em condutividade elétrica (EC) em $\mu\text{S}/\text{cm}$:

$$\begin{aligned} EC &= 133.42 \cdot V^3 - 255.86 \cdot V^2 + 857.39 \cdot V \\ &= 133.42 \left(\frac{V_{\text{medido}}}{1 + 0.02 \cdot (T - 25)} \right)^3 - 255.86 \left(\frac{V_{\text{medido}}}{1 + 0.02 \cdot (T - 25)} \right)^2 \\ &\quad + 857.39 \left(\frac{V_{\text{medido}}}{1 + 0.02 \cdot (T - 25)} \right) \end{aligned}$$

Essa formulação permite estimar a condutividade elétrica da solução de forma compensada pela temperatura, informação essencial para o monitoramento em sistemas de hidroponia. Os coeficientes do polinômio para conversão foram obtidos a partir de calibração fornecida pelo fabricante do módulo [29].

O sensor **DHT22** é um sensor digital de temperatura e umidade do ar amplamente utilizado em sistemas de monitoramento ambiental pela simplicidade de integração e boa precisão. Ele combina um sensor capacitivo para umidade e um termistor para temperatura, e a comunicação com o microcontrolador é por meio de um protocolo digital proprietário de fio único. Esse sensor opera entre 3.3V e 5.5V, com faixa de medição de -40°C a $+80^\circ\text{C}$ e de 0% a 100% de umidade relativa e precisão de $\pm 0.5^\circ\text{C}$ para a temperatura e $\pm 2\%$ para a umidade.

O sensor de fluxo **YF-S201** utiliza o efeito Hall² para medir a vazão da solução nutritiva nas bancadas da estufa. O sensor funciona através de uma hélice interna acoplada a um sensor de efeito Hall que gera pulsos digitais proporcionais à rotação da hélice. A frequência desses pulsos é diretamente proporcional à vazão, sendo possível realizar a conversão para litros por minuto através da equação:

$$Q = \frac{f}{K}$$

em que Q é a vazão em litros por minuto, f a frequência dos pulsos e $K = 7.5$ (pulsos/L) é o fator de calibração informado pelo fabricante.

O sensor de pH utilizado é composto por um módulo **PH-4502C** e uma sonda submersível que realiza a medição da acidez ou alcalinidade da solução

²Fenômeno que produz tensão elétrica em um condutor submetido a um campo magnético perpendicular à corrente elétrica [30]

nutritiva. Essa sonda funciona através de uma membrana de vidro sensível a íons H^+ , gerando uma diferença de potencial proporcional à concentração de íons H^+ na solução. O módulo, por sua vez, realiza o condicionamento e amplificação do sinal fornecido pela sonda, fornecendo uma saída analógica entre 0 e 3.3V que pode ser lida pelo ADC do ESP32.

Esse sensor opera em 5V e possui faixa de medição de pH entre 0 e 14 e temperatura de operação entre 0°C e 60°C. Após calibração adequada, o sensor apresenta precisão de aproximadamente ± 0.1 pH. No entanto, para alcançar essa precisão, é necessário fazer um processo de calibração utilizando soluções tampão de valor de pH conhecido.

Para a calibração, foram utilizadas uma solução de pH 4.01 e outra de pH 6.86. O procedimento consiste em imergir a sonda nas soluções, esperar a leitura estabilizar e registrar a tensão medida. A partir dos valores de tensão medidos, é possível calcular uma equação linear que relaciona a tensão ao valor real de pH.

Para o sensor utilizado no projeto, foi obtida a seguinte fórmula de conversão por meio da calibração:

$$pH = -4.2537 * V + 17.4943$$

onde V é a tensão medida.

O sensor **XKC-Y25-V** é um sensor capacitivo sem contato utilizado para monitorar o nível da solução nutritiva no reservatório. Diferentemente dos sensores de nível convencionais que necessitam contato direto com o líquido, este sensor funciona através da detecção de variações na capacitância causadas pela presença de líquido próximo à sua superfície sensível. Quando o nível do líquido atinge a altura do sensor, a capacitância medida aumenta, acionando a saída digital do sensor.

Embora o fabricante especifique operação entre 5V e 24V, o sensor foi testado e opera adequadamente com alimentação de 3.3V fornecida pelo ESP32, fornecendo uma saída digital (alto ou baixo) que indica a presença ou ausência de líquido no nível de instalação do sensor. O sensor possui invólucro resistente à água, permitindo instalação externa no reservatório, facilitando a manutenção.

Por não possuir partes móveis, o sensor é menos suscetível a travamentos e falhas mecânicas comuns em boias convencionais, que podem ocorrer devido ao acúmulo de resíduos ou desgaste. Além disso, a sensibilidade da

detecção de presença de água pode ser ajustada através de um potenciômetro presente no módulo, permitindo calibração para diferentes espessuras de parede do reservatório e tipos de líquido.

3.2.3 Atuadores

Além dos sensores, o sistema conta com dispositivos responsáveis pela ação física de circulação da solução nutritiva e iluminação das plantas.

A circulação da solução é realizada por uma bomba submersa modelo **PL-202**, que bombeia o líquido do reservatório para as bancadas. Essa bomba possui vazão máxima de 600 L/h e opera com alimentação de 110V ou 220V AC. O acionamento da bomba é controlado pelo ESP32 utilizando de um módulo relé, sendo gerenciado automaticamente pelo sistema.

A iluminação artificial suplementar para as plantas nas bancadas é fornecida por uma lâmpada LED E27 de espectro completo, composta por LEDs azuis e vermelhos, responsáveis pelos comprimentos de onda mais relevantes para o processo fotossintético. Seu acionamento é igualmente controlado por relé, permitindo a automatização dos ciclos de luz conforme as necessidades específicas da cultura.

3.3 Implementação de Hardware

A implementação física do sistema exigiu atenção às conexões entre os diversos componentes eletrônicos. Nas duas placas de controle, do reservatório e das bancadas, o ESP32, atuando como unidade central de processamento, foi alimentado por uma fonte capaz de fornecer a corrente necessária para todo o circuito, incluindo picos de consumo durante transmissões via Wi-Fi ou acionamento simultâneo de sensores e atuadores.

Todo o projeto eletrônico do sistema, incluindo o desenvolvimento das placas de controle do reservatório e das bancadas, foi elaborado especificamente para este projeto. A definição das conexões, o dimensionamento dos circuitos e a seleção dos componentes foram conduzidos a partir da análise das especificações técnicas dos sensores, atuadores e do microcontrolador ESP32, garantindo compatibilidade elétrica e funcionamento confiável. Dessa

forma, a implementação física foi realizada sem utilização de esquemas prontos, resultando em um hardware projetado especificamente para atender às demandas do sistema proposto.

Na Figura 3.3, apresenta-se o diagrama das conexões entre sensores, atuadores e microcontrolador na placa do sistema de controle do reservatório.

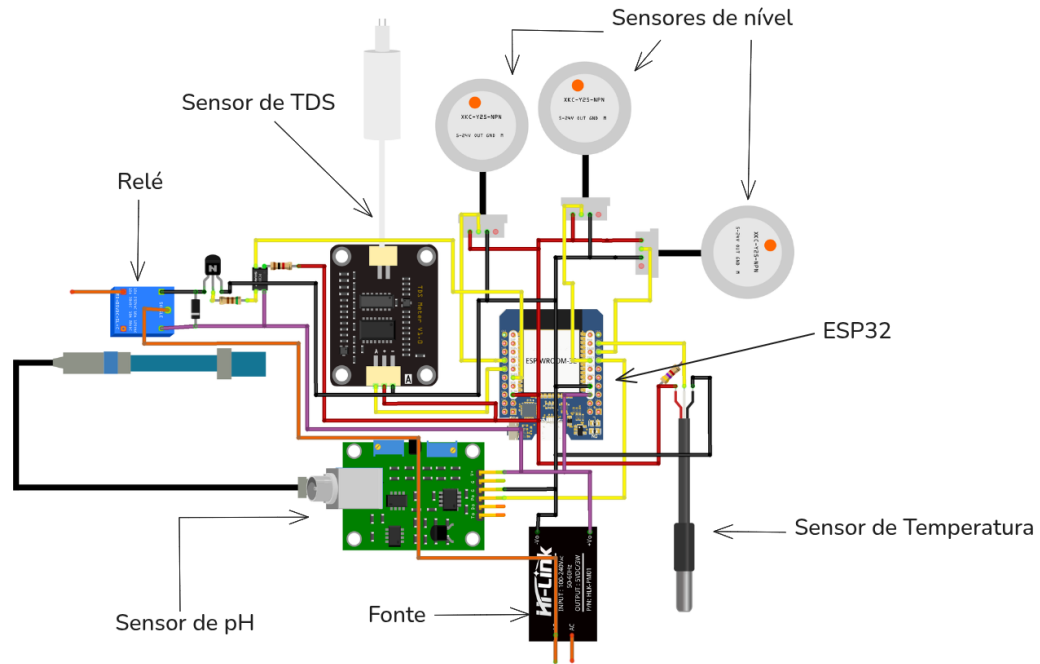


Figura 3.3: Diagrama de conexões do sistema de controle do reservatório.

Na placa do reservatório, o sensor de pH, embora alimentado com 5V para seu circuito interno, possui saída analógica compatível com o nível lógico do ESP32, permitindo conexão direta. Os demais sensores, analógicos e digitais, são alimentados a partir da porta 3.3 V e utilizam três conexões principais: VCC, GND e dados.

O sensor de temperatura DS18B20 requer um resistor *pull-up* de 4.7k Ω conectado entre a linha de dados e a alimentação, garantindo comunicação estável com o microcontrolador, conforme especificações do fabricante.

O módulo relé desta placa representa a interface entre o sistema de controle digital e a bomba de circulação da solução nutritiva. Resistores

limitadores de corrente foram adicionados para proteção do ESP32 durante o acionamento. Além disso, o isolamento elétrico do módulo assegura a separação entre o circuito lógico de baixa potência e a carga em corrente alternada da bomba.

Na Figura 3.4, é apresentado o diagrama de conexões da placa responsável pelo controle das bancadas.

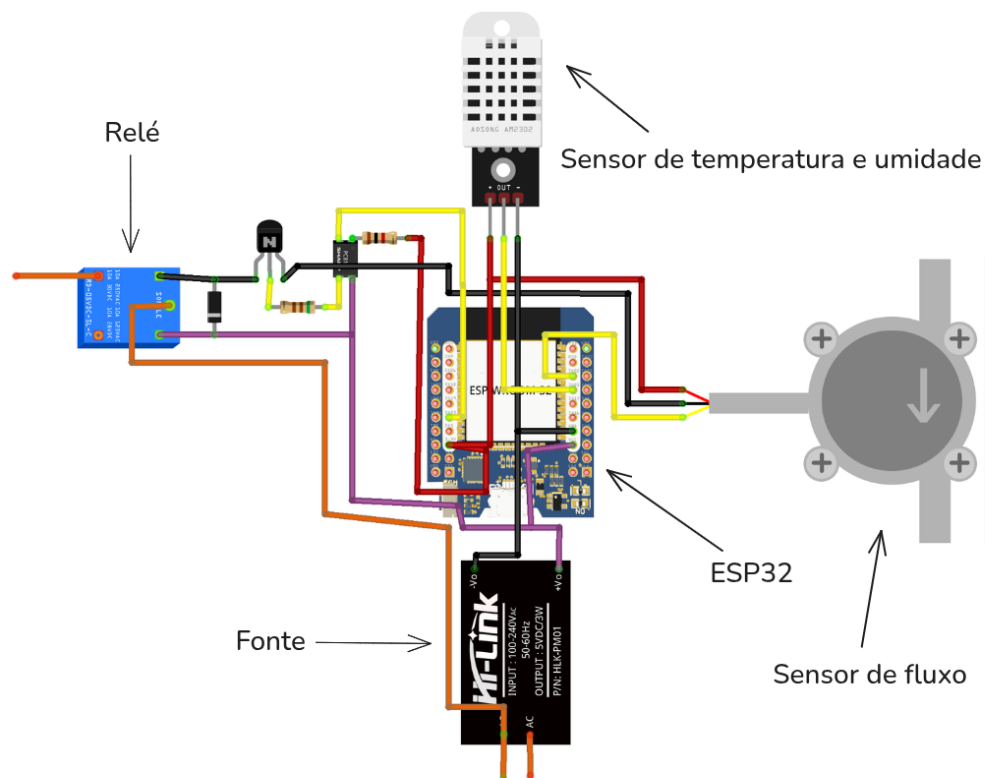


Figura 3.4: Diagrama de conexões do sistema de controle das bancadas.

Esta placa segue a mesma arquitetura da placa do reservatório, porém com sensores específicos ao monitoramento das bancadas de cultivo. Os sensores de fluxo e de temperatura e umidade do ar utilizam comunicação digital com três fios (VCC, GND e dados), permitindo leitura direta pelo ESP32. O módulo relé da bancada aciona o sistema de iluminação artificial instalado acima das plantas.

Ambas as placas foram desenvolvidas em circuito impresso, com sen-

sores, atuadores e demais componentes fixados por soldagem manual nos pontos correspondentes de conexão.

Os custos dos componentes empregados na montagem do sistema estão organizados no Apêndice B, onde são apresentados os valores individuais e os subtotais por módulo. Com base nesses dados, estima-se que a implementação completa de uma unidade do sistema tenha um custo aproximado de R\$ 195,33 para o módulo do reservatório e de R\$ 98,84 para cada bancada de cultivo adicional.

3.4 Comunicação MQTT

A troca de informações entre os módulos do sistema é baseada no protocolo MQTT, em razão de sua leveza, confiabilidade e adequação a aplicações IoT compostas por múltiplos dispositivos distribuídos.

O *broker* MQTT é executado localmente no módulo de controle geral, centralizando as conexões com todos os módulos de reservatório e bancadas, como é exemplificado na Figura 3.5. Para garantir a segurança da comunicação, é utilizada autenticação por usuário e senha, assegurando que apenas dispositivos autorizados possam publicar ou subscrever em tópicos, evitando inserções indevidas de dados mantendo a integridade da rede.

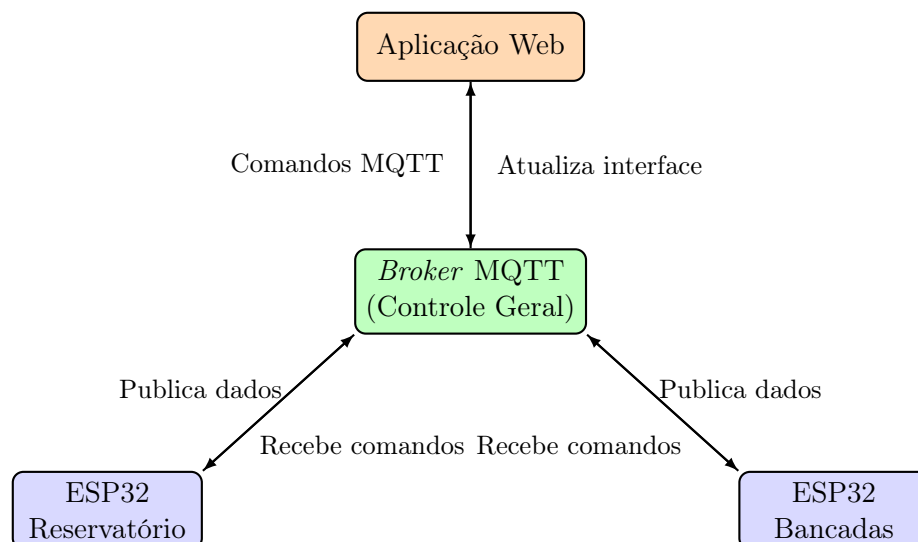


Figura 3.5: Arquitetura de comunicação entre os módulos via MQTT

A organização hierárquica dos tópicos adotada pelo sistema foi projetada para ser simples e flexível, permitindo identificar a origem das mensagens sem acoplar rigidamente a estrutura física da instalação à hierarquia de tópicos MQTT. Embora o termo *greenhouse* normalmente se refira à estufa, no contexto deste sistema ele representa o módulo principal de controle da estufa, isto é, o módulo do reservatório, responsável pelo monitoramento dos parâmetros da água. Assim, para fins de nomeação dos tópicos MQTT, *greenhouse* e reservatório se referem ao mesmo módulo.

As bancadas, por sua vez, não incluem o identificador da estufa em seus tópicos. Essa escolha é deliberada: como a vinculação entre uma bancada e uma estufa é feita via software, e não incorporada à hierarquia de tópicos, um módulo de bancada pode ser transferido de uma estufa para outra sem necessidade de alterações no firmware ou renomeação dos tópicos MQTT que utiliza.

Com isso, a estrutura de tópicos adotada é:

- `greenhouse/<id_greenhouse>/sensors;`
- `greenhouse/<id_greenhouse>/commands;`
- `bench/<id_bench>/sensors;`
- `bench/<id_bench>/commands.`

Nessa nomenclatura de tópicos, os identificadores `<id_greenhouse>` e `<id_bench>` correspondem ao endereço MAC do dispositivo (por exemplo: `AA:BB:CC:DD:EE:FF`), garantindo identificação única dos módulos na rede independentemente da disposição física dos equipamentos, sendo responsabilidade da aplicação web o mapeamento de qual estufa cada bancada pertence.

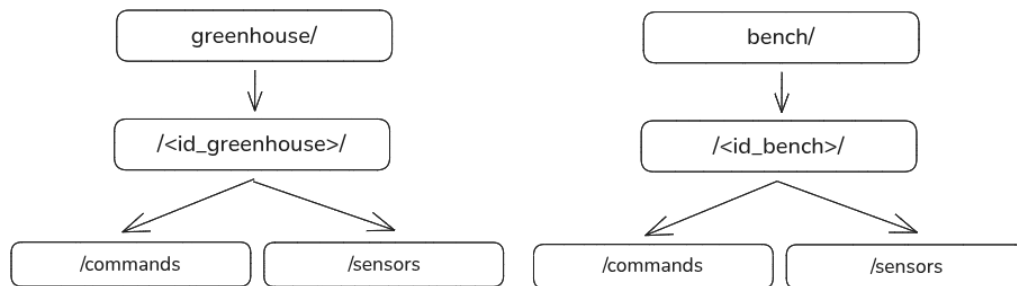


Figura 3.6: Estrutura dos tópicos MQTT para módulos de reservatório (greenhouse) e bancadas (bench).

Todas as mensagens trafegam em formato JSON, o que oferece interoperabilidade e facilidade de interpretação pela aplicação web e pelos módulos embarcados.

A mensagem publicada pelo módulo do reservatório, apresentada na Listagem 3.1, agrupa todos os parâmetros da solução nutritiva e o estado da bomba de circulação. Os valores medidos incluem pH, condutividade elétrica (EC) e temperatura da água, além do estado dos três sensores de nível distribuídos ao longo da altura do reservatório. O campo da bomba indica se ela está ativa no momento da publicação, permitindo que a interface web reflita o estado atual do sistema de circulação.

Listing 3.1: Exemplo de mensagem publicada pelo módulo do reservatório.

```

1 {
2   "ph": 5.86,
3   "ec": 1661.20,
4   "temp": 27.19,
5   "levels": {
6     "level0": true,
7     "level1": true,
8     "level2": false
9   },
10  "pump": true
11 }

```

Já a mensagem das bancadas, exemplificada na Listagem 3.2, reúne os dados ambientais e operacionais coletados em cada unidade. São transmitidos o fluxo de água que alimenta a bancada, a temperatura e umidade do ar

ambiente, além do estado da iluminação artificial. Esses parâmetros permitem monitorar as condições locais de cada bancada de forma independente.

Listing 3.2: Exemplo de mensagem publicada pelo módulo das bancadas.

```
1 {  
2     "flow": 7.18,  
3     "air_temp": 28.4,  
4     "air_humidity": 76.1,  
5     "light": false  
6 }
```

Os comandos enviados pela aplicação web seguem um formato simples e extensível, como mostra a Listagem 3.3. Cada mensagem especifica apenas o atuador alvo e o valor desejado para seu estado, facilitando a interpretação pelos microcontroladores e permitindo que novos atuadores sejam incorporados ao sistema sem necessidade de alterar a estrutura das mensagens.

Listing 3.3: Exemplo de mensagem de comando.

```
1 {  
2     "actuator": "pump",  
3     "value": false  
4 }
```

As mensagens publicadas pelos módulos seguem uma temporização fixa: tanto o reservatório quanto as bancadas enviam seus dados ao *broker* MQTT a cada 15 segundos. Esse intervalo foi definido por ser suficiente para acompanhar parâmetros que variam de forma relativamente lenta, como pH, EC, temperatura e umidade, ao mesmo tempo em que evita atualizações excessivamente rápidas na interface web. Assim, o sistema mantém uma sensação de monitoramento em tempo quase real sem sobrecarregar a rede ou tornar a visualização instável para o usuário.

O sistema foi projetado para realizar o cadastro automático de novas estufas e bancadas assim que os módulos entram em operação e iniciam a publicação de mensagens via MQTT. Ao receber uma mensagem em um dos tópicos de monitoramento, o servidor verifica se o identificador do dispositivo já está registrado na base de dados. Caso contrário, o registro é criado automaticamente.

Embora o processo de cadastramento seja totalmente automatizado, a comunicação continua protegida pelo mecanismo de autenticação do *broker*

MQTT. Cada módulo só consegue se conectar ao *broker* após fornecer um par válido de usuário e senha, configurados previamente no firmware do dispositivo. Dessa forma, apenas equipamentos autorizados podem estabelecer uma sessão MQTT, ainda que o servidor aceite e registre automaticamente qualquer módulo autenticado que passe a publicar dados.

Dessa forma, não é necessária nenhuma intervenção manual do usuário para cadastrar novos módulos. Basta que o dispositivo de controle da estufa ou bancada esteja corretamente configurado e conectado ao *broker* MQTT. Assim, o sistema reconhece sua presença e o exibe automaticamente na aplicação web.

Essa abordagem simplifica o processo de expansão da infraestrutura, permitindo que novas unidades sejam adicionadas de forma *plug-and-play*, contribuindo para a escalabilidade e para a usabilidade do sistema.

3.5 Aplicação Web

A interface de monitoramento e controle do sistema foi desenvolvida como uma aplicação web utilizando Elixir³ com o *framework* Phoenix LiveView⁴.

O Elixir é uma linguagem funcional que executa sobre a máquina virtual Erlang (BEAM), conhecida por sua capacidade de lidar com alta concorrência e sistemas distribuídos. O Phoenix LiveView, por sua vez, é um *framework* que permite criar interfaces web dinâmicas e reativas mantendo toda a lógica de aplicação no lado do servidor. Diferentemente de arquiteturas tradicionais que separam *frontend* e *backend*, o LiveView estabelece uma conexão WebSocket persistente entre o navegador e o servidor, onde toda a renderização e lógica de negócio permanecem no servidor. O navegador recebe apenas as atualizações necessárias da interface, resultando em aplicações altamente responsivas sem necessidade de código JavaScript no cliente.

Essa arquitetura unificada é particularmente vantajosa para o sistema de controle geral. Toda a aplicação executa dentro de um único nó BEAM, onde o cliente MQTT, a lógica de negócio e os processos do LiveView operam de forma integrada. O cliente MQTT conecta-se diretamente ao *broker*

³<https://elixir-lang.org/>

⁴https://hexdocs.pm/phoenix_live_view/Phoenix.LiveView.html

local, subscrevendo-se aos tópicos de monitoramento dos dispositivos do reservatório e bancadas. Ao receber uma mensagem MQTT, os dados são processados, persistidos no banco de dados e propagados para todas as sessões LiveView ativas, que automaticamente atualizam as interfaces dos navegadores conectados. Essa integração elimina a necessidade de APIs intermediárias ou camadas de sincronização entre diferentes componentes do sistema.

Para a persistência dos dados, é utilizado um banco de dados relacional PostgreSQL, no qual são armazenadas as entidades principais do sistema: dispositivos, configurações das estufas, leituras dos sensores e cronogramas de atuação. Não há política de retenção ou purga automática: todos os dados publicados pelos dispositivos são armazenados integralmente, o que favorece análises históricas, auditoria e reprodutibilidade dos resultados.

A tela principal da aplicação web, apresentada na Figura 3.7, exibe todas as estufas cadastradas no sistema, em formato tabular, com os valores mais recentes de cada parâmetro monitorado. Para facilitar a análise visual, é utilizada codificação por cores com base nos valores ideais configurados para a estufa: verde para condições adequadas, amarelo para valores próximos aos limites de alerta e vermelho para condições críticas.

Nome da Estufa	Cultura	pH	Temperatura da Água	EC	Temperatura do Ar	Umidade do Ar	Fluxo de Água	Estado da Bomba	Estado das Luzes
Estufa Principal	Affrace Crenga	7.28	26.94°C	1347.95	27.90°C	78.00%	1.87	Ligada	Desligada
Estufa Secundária	Affrace Americana	5.30	24.00°C	1050.00	28.00°C	77.00%	3.00	Ligada	Ligada
Estufa	Couve	6.10	28.00°C	750.00	22.50°C	68.00%	2.50	Desligada	Ligada
Estufa 3	Rúcula	6.80	25.00°C	1000.00	27.00°C	60.00%	3.50	Ligada	Ligada

Figura 3.7: Página inicial do sistema.

Ao acessar uma estufa, o usuário é redirecionado para a interface detalhada mostrada na Figura 3.8, que apresenta gráficos históricos de todos os parâmetros monitorados, além de uma tabela contendo as leituras mais recentes da estufa e de suas bancadas. Nessa página, também estão disponíveis controles manuais para o acionamento da bomba de circulação e do sistema de iluminação, por meio de botões liga/desliga.

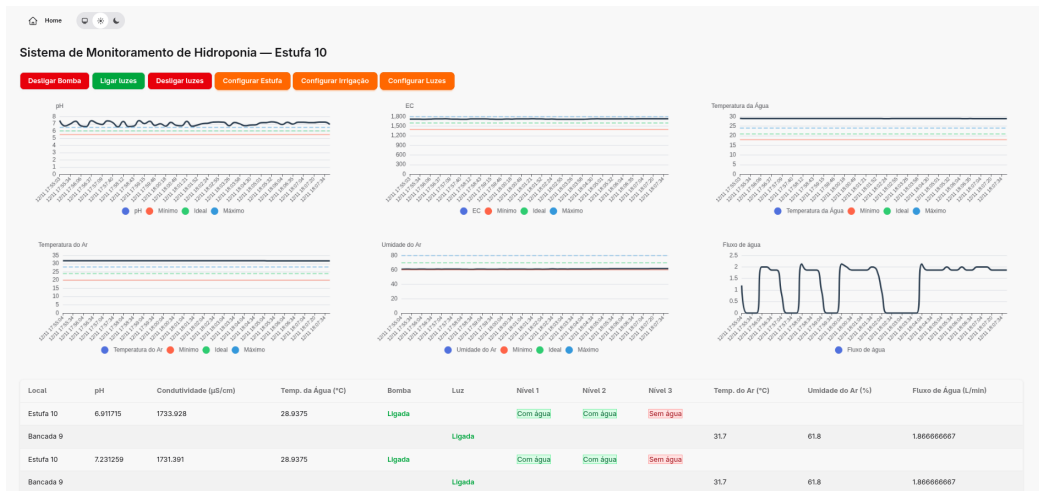


Figura 3.8: Página de detalhes da estufa.

Além do monitoramento em tempo real, a aplicação web permite a configuração completa da estufa e cronogramas de irrigação e iluminação, conforme ilustrado nas Figuras 3.9, 3.10 e 3.11.

Configurações da Estufa

Bancadas vinculadas

- Bancada 9
- Bancada 10
- Bancada 11
- Bancada 15

Selecione uma bancada:

Nome da estufa:

Nome do Cultivo:

Temperatura da Água Mínima (°C): Temperatura da Água Ideal (°C): Temperatura da Água Máxima (°C):

Temperatura Mínima (°C): Temperatura Ideal (°C): Temperatura Máxima (°C):

Umidade Mínima (%): Umidade Ideal (%): Umidade Máxima (%):

pH Mínimo: pH Ideal: pH Máximo:

Condutividade Mínima (nS/cm): Condutividade Ideal (nS/cm): Condutividade Máxima (nS/cm):

Figura 3.9: Seção de configuração da estufa.

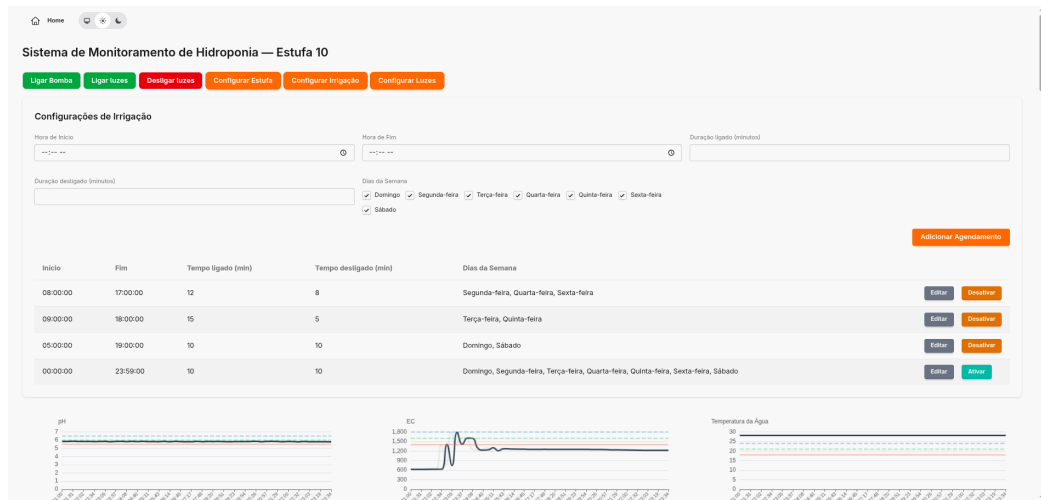


Figura 3.10: Seção de configuração da irrigação.

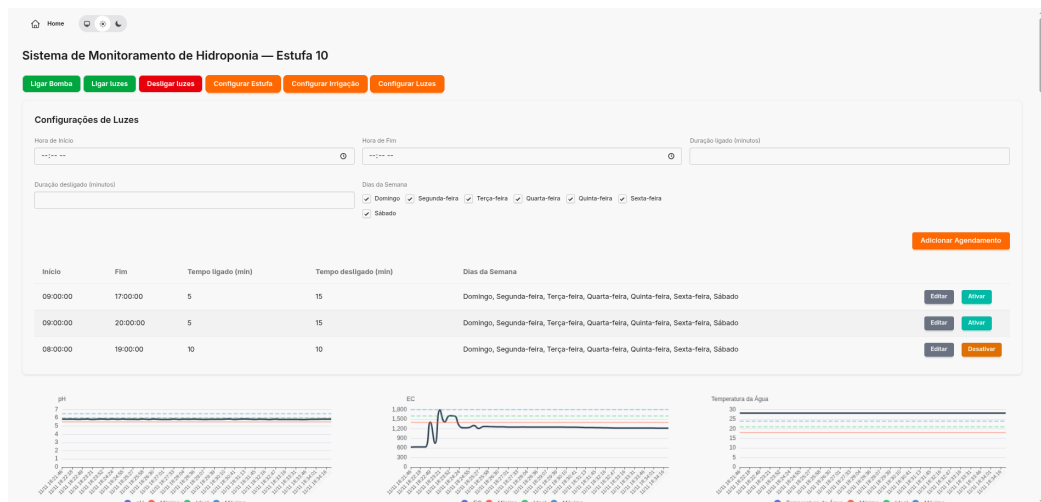


Figura 3.11: Seção de configuração das luzes.

Na seção de configuração da estufa (Figura 3.9), é possível definir o nome da estufa, o cultivo associado e os valores mínimo, ideal e máximo para cada parâmetro da água e do ambiente. Já na seção de configuração de cronogramas de irrigação e iluminação (Figuras 3.10 e 3.11), o usuário pode cadastrar diferentes programações, definindo horário de início e término, tempos ligado/desligado em minutos e os dias da semana de execução, não sendo permitidos períodos sobrepostos no mesmo dia.

Os valores ideais padrão adotados no sistema foram definidos com base na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Valores de referência para cultivo hidropônico. Fonte: Adaptado de [31] e [32].

Parâmetro	Mínimo	Ideal	Máximo
pH	5,5	5,8 - 6,5	7,0
Condutividade Elétrica (mS/cm)	0,8	1,2 - 1,8	2,5
Temperatura da água (°C)	16	18 - 24	28
Temperatura do ar (°C)	18	22 - 26	30
Umidade do ar (%)	50	60 - 70	80

3.5.1 Considerações de Implementação

A unificação entre aquisição de dados, lógica de controle e interface web em um único nó BEAM simplificou significativamente a arquitetura do sistema. A integração nativa entre LiveView, o cliente MQTT e o banco de dados eliminou camadas intermediárias e reduziu pontos de falha, mantendo latência baixa mesmo com múltiplas sessões simultâneas.

O modelo reativo do LiveView mostrou-se adequado para monitoramento contínuo, permitindo atualização imediata dos parâmetros e dos gráficos históricos sem necessidade de código cliente adicional. A propagação automática das atualizações para todas as sessões conectadas garante que múltiplos usuários visualizem o mesmo estado do sistema simultaneamente, sem necessidade de sincronização manual ou recarregamento da página.

A estrutura de configuração centralizada também facilitou ajustes operacionais, tornando o sistema flexível para diferentes tipos de cultivo e rotinas de manejo. A capacidade de definir múltiplos cronogramas independentes para irrigação e iluminação, combinada com a validação automática de sobreposições, reduz erros de configuração e permite maior controle sobre as condições de cultivo.

O armazenamento completo do histórico de leituras no PostgreSQL favorece tanto a visualização de tendências quanto eventuais análises retros-

pectivas sobre o desempenho do sistema, sem depender de políticas de agregação ou descarte de dados que poderiam comprometer a rastreabilidade das informações.

Capítulo 4

Resultados

A validação do sistema foi realizada em etapas, iniciando com testes individuais dos sensores, seguindo para a avaliação da integração dos módulos de controle e, por fim, testes em operação real na estufa. Esta seção apresenta os resultados obtidos em cada fase, demonstrando o funcionamento do sistema proposto.

4.1 Testes Individuais de Sensores

Os testes iniciais foram conduzidos com cada sensor operando isoladamente, conectado ao ESP32 sem a presença de outros componentes no circuito. Nessa etapa, todos os sensores apresentaram funcionamento dentro das especificações dos fabricantes.

O sensor de pH, como mencionado na Seção 3.2, foi calibrado utilizando soluções tampão de pH 4,01 e 6,86, obtendo-se a equação de conversão utilizada no sistema. Para validação dessa calibração, realizou-se a comparação das leituras com um medidor de pH comercial em diferentes soluções: água da torneira, água sanitária e as próprias soluções tampão. Os valores obtidos apresentaram desvio inferior a $\pm 0,2$ unidades de pH, indicando boa concordância entre os sensores, conforme Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Comparação dos valores de pH entre o sensor PH-4502C e o medidor comercial.

Solução	PH-4502C	Comercial
Tampão 4,01	3,9–4,0	4,01
Tampão 6,86	6,8–6,9	6,86
Água da torneira	7,4–7,6	7,5
Água sanitária	10,9–11,05	11,00

A comparação do sensor TDS Meter V1.0 com um medidor comercial de condutividade elétrica foi realizada em diferentes concentrações de água com o adubo líquido utilizado na solução nutritiva. Os resultados demonstraram desvio inferior a 0,15 mS/cm, conforme Tabela 4.2. Observou-se também que o sensor opera adequadamente dentro da faixa avaliada nos testes (aproximadamente 0,35 a 1,77 mS/cm); fora desse intervalo, as leituras tendem a apresentar saturação ou subestimação.

Tabela 4.2: Comparação dos valores de condutividade elétrica (EC) entre o sensor TDS Meter V1.0 e o medidor comercial.

TDS Meter V1.0 (mS/cm)	Comercial (mS/cm)
0,350	0,377
0,477	0,483
0,803	0,809
0,910	0,890
1,100	1,030
1,490	1,350
1,770	1,700

4.2 Teste dos Sensores em Conjunto

Na integração dos sensores no módulo de controle do reservatório - onde pH, condutividade elétrica e temperatura atuam simultaneamente imersos na solução nutritiva - foram observadas interferências eletromagnéticas que afetaram diretamente o desempenho do sensor de pH.

Durante os testes, o sensor de pH apresentou oscilações e desvios significativos em relação aos valores obtidos quando operava isoladamente. Essa instabilidade tornou-se mais acentuada conforme aumentava a condutividade da solução, indicando correlação direta com o funcionamento do sensor de EC, que injeta corrente elétrica na água para realizar a medição da resistência elétrica da mesma.

O módulo PH-4502C utilizado baseia seu funcionamento na diferença de potencial gerada pela concentração de íons H^+ entre o eletrodo de vidro e o eletrodo de referência, diferença essa extremamente pequena e sensível. Quando o sensor de EC opera em paralelo, a corrente introduzida altera a distribuição de cargas e potenciais elétricos no interior da solução, interferindo no eletrodo do sensor de pH e produzindo leituras flutuantes e desvios não lineares.

Apesar de não ter sido possível eliminar o erro de *offset* gerado por essa interferência, técnicas de filtragem digital foram empregadas para reduzir a instabilidade. Em específico, adotou-se maior espaçamento entre as amostragens de pH e o cálculo de média dos valores após ordenação e descarte de valores extremos, considerando 50 leituras consecutivas. Com isso, obteve-se maior consistência nas leituras, embora ainda deslocadas em relação ao valor real do pH.

Embora a operação simultânea dos sensores de pH e condutividade elétrica tenha gerado interferência e variação não linear nos valores de pH, não foram aplicadas correções adicionais além da filtragem digital descrita anteriormente, pois o erro não poderia ser compensado de forma confiável sem alterar a leitura real. Apesar dessa limitação, o monitoramento do pH continua sendo essencial para sistemas hidropônicos, permitindo identificar tendências de aumento ou diminuição da acidez da solução nutritiva. Dessa forma, mesmo que o valor absoluto possa apresentar desvio, o sensor fornece informações úteis para ajustes da solução de acordo com as necessidades da cultura, sendo um parâmetro crítico no manejo das plantas.

Os demais sensores — DHT22, YF-S201, XKC-Y25-V e DS18B20 — apresentaram comportamento consistente com os testes individuais, mantendo estabilidade e funcionamento adequado quando operando em conjunto, sem impacto perceptível nas leituras.

4.3 Registro de Teste em Sistema Real

Para realizar a validação do sistema desenvolvido, foi utilizada uma estrutura de produção hidropônica *indoor* em pequena escala, mostrada na Figura 4.1, na qual foram plantadas nove mudas de alface do tipo crespa.



Figura 4.1: Imagens do sistema real de cultivo hidropônico monitorado pelo sistema proposto.

Para ilustrar o comportamento do sistema em operação real, a Tabela 4.3 apresenta a média dos valores medidos pelo sistema nos últimos sete dias do experimento. No campo “Nível de água”, o valor corresponde à média de três sensores de nível sem contato, mapeada em uma escala de 0 a 3 ($T/T/T = 3$; $T/T/F = 2$; $T/F/F = 1$; $F/F/F = 0$).

Nessa representação, **T** indica a presença de água e **F** indica ausência.

Além disso, a ordem apresentada (esquerda para direita) corresponde à disposição vertical dos sensores, onde o sensor mais à esquerda é o localizado na parte inferior do reservatório e o mais à direita é o sensor superior.

Tabela 4.3: Valores médios medidos nos últimos dias de operação do sistema.

Período	Temperatura da água (°C)	Condutividade (µS/cm)	Nível de Água	pH	Temperatura do ambiente (°C)	Umidade do ambiente (%)
09/11/2025 12:01 à 23:59	26.66	1751.41	2.5	5.88	28.78	70.21
10/11/2025 00:01 à 12:00	26.05	1558.00	1.9	5.88	27.28	70.39
10/11/2025 12:00 à 23:59	27.58	1158.00	2	5.90	29.49	68.52
11/11/2025 00:01 à 12:00	26.35	984.73	1.37	5.90	27.61	76.92
11/11/2025 12:00 à 23:59	27.03	956.49	1.73	5.85	29.33	67.91
12/11/2025 00:01 à 12:00	29.16	923.91	2.57	5.52	29.16	74.82
12/11/2025 12:00 à 23:59	28.86	1361.88	2.28	6.72	31.15	67.41
13/11/2025 00:01 à 12:00	28.05	1546.88	2	7.09	28.98	77.76
13/11/2025 12:01 à 23:59	27.55	1473.43	2	7.30	28.55	85.91
14/11/2025 00:01 à 12:00	26.57	1302.12	2	7.55	26.82	97.02
14/11/2025 12:01 à 23:59	26.46	1168.99	2	7.71	27.07	94.72
15/11/2025 00:01 à 12:00	25.81	1102.73	2	7.85	26.24	98.91
15/11/2025 12:01 à 23:59	26.46	992.02	2	7.74	27.34	91.34
16/11/2025 00:01 à 12:00	25.89	882.84	2	7.79	26.38	96.15
16/11/2025 12:01 à 23:59	26.60	774.02	2.7	7.51	28.22	77.33

A partir dos dados coletados, observa-se que a temperatura da água, a temperatura do ar e a umidade relativa do ambiente permaneceram em faixas relativamente estáveis ao longo do período monitorado, com variações compatíveis com um sistema *indoor* sem controle ativo de climatização. Esses valores mantiveram-se próximos das faixas recomendadas para o cultivo de alface, conforme a Tabela 3.1.

A condutividade elétrica, por sua vez, apresenta tendência de queda gradual ao longo dos dias, refletindo o consumo de nutrientes pelas plantas. Também se observa o efeito da reposição de adubo realizada no período da tarde do dia 12/11, quando a condutividade volta a se elevar, retornando a níveis mais próximos dos considerados ideais para o desenvolvimento da cultura.

Em relação ao pH, nota-se uma elevação progressiva dos valores medi-

dos ao longo dos dias. Entretanto, como discutido anteriormente, as leituras de pH são influenciadas por interferências eletroquímicas decorrentes da operação simultânea do sensor de condutividade. Assim, embora o sistema registre a tendência temporal das variações, os valores absolutos de pH devem ser interpretados com cautela.

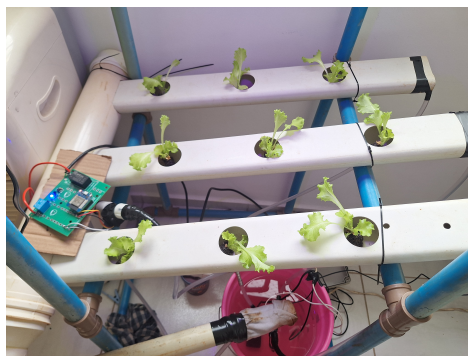
A Figura 4.2 mostra a evolução das mudas ao longo do cultivo. Além das diferenças de iluminação — que favoreceram tanto a fileira inferior, exposta a maior luz solar, quanto o canal central, diretamente sob a luz de crescimento — observa-se que as plantas mantiveram desenvolvimento uniforme, coloração verde consistente e folhas íntegras ao longo do período. Não houve indícios visuais de pragas, danos foliares ou outros problemas aparentes, indicando condições adequadas de cultivo durante o experimento.



(a) 05/11/25 - Plantio.



(b) 08/11/25.



(c) 12/11/25.



(d) 14/11/25.

Figura 4.2: Imagens do desenvolvimento das plantas ao longo do cultivo monitorado.

4.4 Considerações sobre os Resultados

Os testes realizados demonstraram que o sistema de monitoramento e controle funcionou de forma satisfatória em ambiente real de cultivo. Os sensores DHT22, YF-S201, XKC-Y25-V, DS18B20 e TDS Meter apresentaram leituras consistentes e alinhadas às expectativas, permitindo o acompanhamento contínuo dos parâmetros essenciais da estufa. A única limitação identificada ocorreu no sensor de pH, que apresentou deslocamento sistemático devido à interferência eletroquímica provocada pela operação simultânea do sensor de condutividade. Ainda assim, a aplicação de filtragem digital reduziu a instabilidade, permitindo a identificação de tendências na acidez da solução.

Os atuadores operaram corretamente durante toda a fase experimental, especialmente no acionamento automático da bomba de recirculação e da iluminação conforme os cronogramas definidos. Isso confirma a eficiência do sistema proposto na execução autônoma das ações necessárias ao cultivo.

A arquitetura distribuída baseada em MQTT demonstrou boa escalabilidade e robustez, possibilitando a integração de múltiplas bancadas e estufas sem modificações estruturais na plataforma. Dessa forma, o sistema atendeu aos objetivos propostos, comprovando sua viabilidade técnica para aplicação em ambientes hidropônicos de pequena escala e com potencial para expansão.

Capítulo 5

Conclusão

O presente trabalho propôs e implementou um sistema automático de monitoramento e atuação para produção hidropônica baseado na técnica *Nutrient Film Technique* (NFT), estruturado em uma arquitetura modular, escalável e orientada à IoT. O objetivo central — desenvolver uma solução capaz de monitorar parâmetros críticos da solução nutritiva e do ambiente, controlar atuadores de forma autônoma e permitir expansão horizontal (múltiplas bancadas) e vertical (múltiplas estufas) — foi plenamente alcançado.

A revisão sistemática da literatura evidenciou a predominância de sistemas monolíticos, de pequena escala e com funcionalidades restritas. Em contraste, o sistema apresentado diferencia-se por:

1. Arquitetura hierárquica em três níveis (controle geral, reservatório e bancada), com cadastro automático de novos módulos via MQTT, facilitando escalabilidade;
2. Utilização exclusiva do ESP32 em todos os módulos, garantindo padronização do hardware, maior capacidade de processamento e conectividade Wi-Fi integrada;
3. Distribuição de sensores por bancada, permitindo monitoramento localizado e independente;
4. Aplicação web em tempo real, com visualização histórica de dados, configuração de faixas ideais para parâmetros e definição de cronogramas de irrigação e iluminação.

Os testes em ambiente real de cultivo hidropônico, utilizando alface crespa, confirmaram a viabilidade prática do sistema, o qual manteve parâmetros essenciais dentro das faixas recomendadas e reduziu significativamente a necessidade de intervenção humana, exceto pela reposição manual de nutrientes. A solução demonstrou, assim, potencial para uso em produções urbanas e rurais em diferentes escalas, com baixo custo de implementação e operação.

Do ponto de vista econômico, o sistema apresenta custos competitivos tanto em investimento inicial quanto em operação. Conforme detalhado no Apêndice B, o custo de implementação por módulo do reservatório é de R\$ 195,06 e por módulo de bancada é de R\$ 98,57, totalizando aproximadamente R\$ 293,63 para um sistema completo com uma bancada. Este valor é inferior por exemplo, ao sensor comercial utilizado para validação, que custou R\$ 429,00, além de diminuir a necessidade de mão de obra.

Em relação ao consumo energético, conforme apresentado no Apêndice C, o sistema apresentou valores médios de apenas 0,03 kWh/dia para o módulo do reservatório e 0,026 kWh/dia para o módulo das bancadas. Esses valores consideram operação contínua em potência máxima, caracterizando um cenário conservador. Na prática, devido aos ciclos de leitura, transmissões intermitentes e operação parcial de relés e sensores, o consumo efetivo tende a ser significativamente menor. Esse resultado reforça a viabilidade do sistema para operação contínua com baixo custo energético.

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas:

1. Deslocamento persistente nas leituras de pH devido à interferência eletroquímica do sensor de condutividade;
2. Dependência da conectividade Wi-Fi local para comunicação entre os módulos;
3. Precisão limitada dos sensores em condições extremas;
4. Adição de novos sensores demanda alteração no firmware dos módulos e no software do servidor;
5. Ausência de controle automático de reposição de nutrientes.

Com base nessas limitações, algumas melhorias e extensões podem ser exploradas em trabalhos futuros:

1. Avaliação de sensores de pH com maior imunidade a interferências eletroquímicas;
2. Implementação de controle automático da adição de nutrientes e reposição da água evaporada;
3. Investigação do uso de tecnologias de comunicação alternativas, como LoRaWAN e Zigbee, para aplicações em áreas maiores;
4. Integração com técnicas de visão computacional para detecção precoce de pragas e doenças, ampliando o nível de automação do cultivo.

Em síntese, o sistema desenvolvido contribui para democratizar o acesso a tecnologias de cultivo hidropônico mais eficientes, oferecendo uma solução de baixo custo, modular e escalável, alinhada às demandas atuais por práticas agrícolas sustentáveis e inteligentes.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

- [1] Imran Ali Lakhiar, Haofang Yan, Tabinda Naz Syed, Chuan Zhang, Sher Ali Shaikh, Md Rakibuzzaman, and Rahim Bux Vistro. Soilless agricultural systems: Opportunities, challenges, and applications for enhancing horticultural resilience to climate change and urbanization. *Horticulturae*, 11(6):568, 2025.
- [2] Dimitra I Pomoni, Maria K Koukou, Michail Gr Vrachopoulos, and Labros Vasiliadis. A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. *Energies*, 16(4):1690, 2023.
- [3] Seerat Jan, Zahida Rashid, Tanveer Ahmad Ahngar, Sadaf Iqbal, M Abbass Naikoo, Shabina Majeed, Tauseef Ahmad Bhat, Razia Gul, and Insha Nazir. Hydroponics—a review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 9(8):1779–1787, 2020.
- [4] Ganapathy Rajaseger, Kit Lun Chan, Kay Yee Tan, Shan Ramasamy, Mar Cho Khin, Anburaj Amaladoss, and Patel Kadamb Haribhai. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. *Bioinformatics*, 19(9):925, 2023.
- [5] Merle H. Jensen. Hydroponics. *HortScience*, 32(6):1018–1021, 1997.
- [6] Karen Rose, Scott Eldridge, Lyman Chapin, et al. The internet of things: An overview. *The internet society (ISOC)*, 80(15):1–53, 2015.
- [7] Wan-Soo Kim, Won-Suk Lee, and Yong-Joo Kim. A review of the ap-

plications of the internet of things (iot) for agricultural automation. *Journal of Biosystems Engineering*, 45(4):385–400, 2020.

- [8] Akshay Mendon, Bhavya Manoj Votavat, and Shashank Singh. Design and construction of automated hydroponics system with remote monitoring and control. In *2022 13th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, pages 1–5. IEEE, 2022.
- [9] Santosh Narayanan, B Ambareesh, Manoj Parthiban, Aniket Lokare, and KP Peeyush. Development of a platform independent hydroponic system controller. In *2024 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)*, pages 1–6. IEEE, 2024.
- [10] Huu Cuong Nguyen, Bich Thuy Vo Thi, and Quang Hieu Ngo. Automatic monitoring system for hydroponic farming: Iot-based design and development. *Asian Journal of Agriculture and Rural Development*, 12(3):210–219, 2022.
- [11] Eza Yolanda Fitria, Muhammad Ary Murti, and Casi Setianingsih. Design of integrated control system based on iot with context aware method in hydroponic plants. In *2021 IEEE International Conference on Industry 4.0, Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)*, pages 20–26. IEEE, 2021.
- [12] Palash Gourshettiwar and KTV Reddy. Development of an iot-enabled real-time monitoring and alert system model for hydroponic farming. In *2025 5th International Conference on Trends in Material Science and Inventive Materials (ICTMIM)*, pages 1161–1167. IEEE, 2025.
- [13] Helmy Helmy, Dian Ayu Mifftahul Janah, Arif Nursyahid, Muhlasah Novitasari Mara, Thomas Agung Setyawan, and Ari Sriyanto Nugroho. Nutrient solution acidity control system on nft-based hydroponic plants using multiple linear regression method. In *2020 7th International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE)*, pages 272–276. IEEE, 2020.
- [14] Manuel J Ibarra, Edgar Alcarraz, Olivia Tapia, Yalmar Ponce Atencio, Yonatan Mamani-Coaquira, and Herwin Alayn Huillcen Baca. Nft-i technique using iot to improve hydroponic cultivation of lettuce. In *2020 39th International Conference of the Chilean Computer Science Society (SCCC)*, pages 1–7. IEEE, 2020.

- [15] Swati Jain and Mandeep Kaur. Design and implementation of an iot-based indoor hydroponics farm with automated climate and light control. In *International Conference on Computing, Communications, and Cyber-Security*, pages 3–15. Springer, 2022.
- [16] C Joshitha, Bobba Pandu Ranga, Bandi Harshini Reddy, et al. A sensor-driven automated hydroponic system for optimized plant growth in diverse environments. In *2025 International Conference on Intelligent and Innovative Technologies in Computing, Electrical and Electronics (IITCEE)*, pages 1–7. IEEE, 2025.
- [17] Kunal Kulkarni, Vinaya Gohokar, Pradnya Kulkarni, and Trushita Chaware. Cloud-based internet of things architecture for hydroponics farm automation. In *International Conference on ICT for Sustainable Development*, pages 181–196. Springer, 2023.
- [18] Ravi Lakshmanan, Mohamed Djama, Sathish Kumar Selvaperumal, and Raed Abdulla. Automated smart hydroponics system using internet of things. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 10(6):6389–6398, 2020.
- [19] Subuh Pramono, Arif Nuruddin, and Muhammad Hamka Ibrahim. Design of a hydroponic monitoring system with deep flow technique (dft). In *AIP Conference Proceedings*, volume 2217, page 030195. AIP Publishing LLC, 2020.
- [20] Seema Rathod, Sneha Dhanan, S Sri Harsha, Shivam Choudhary, and Sharmila KP. Lora technology based hydroponic farm monitoring system. In *2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, pages 1–7. IEEE, 2021.
- [21] Kenny Kueh Yung Shin, Tan Ping Ping, Maybelline Goh Boon Ling, Chong Chee Jiun, and Noor Alamshah B Bolhassan. Smart grow-low-cost automated hydroponic system for urban farming. *HardwareX*, 17:e00498, 2024.
- [22] Nico Surantha and Vito Vincentdo. Nft-based hydroponic automated control using adaptive network-based fuzzy inference system. In *2022 2nd International Conference on Robotics, Automation and Artificial Intelligence (RAAI)*, pages 118–123. IEEE, 2022.

- [23] Eng-Kee Tan, Yung-Wey Chong, Muhammad Niswar, Boon-Yaik Ooi, and Achmad Basuki. An iot platform for urban farming. In *2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, pages 51–55. IEEE, 2020.
- [24] Lean Karlo S Tolentino, Rachelle B Delos Santos, Nikka Marie V Ebbay, Wendel G Mendez, Kim Rafael Q San Andres, Rem Raymond M Tamayo, Gilfred Allen M Madrigal, Romeo L Jorda, Jay Fel Quijano, Cherry G Pascion, et al. Hylo: Implementation of lorawan in an automated hydroponics system. In *2021 IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNBC)*, pages 1–6. IEEE, 2021.
- [25] M Venkatraman and R Surendran. Design and implementation of smart hydroponics farming for growing lettuce plantation under nutrient film technology. In *2023 2nd International Conference on Applied Artificial Intelligence and Computing (ICAAIC)*, pages 1514–1521. IEEE, 2023.
- [26] Abang Muhamad Zaid, Natasha Amira Abdul Rauf, Danial Md Nor, Sharifah Saon, Abd Kadir Mahamad, Mohd Anuaruddin Bin Ahmadon, and Shingo Yamaguchi. Iot-based smart hydroponic system using nutrient film technique (nft) for lettuce plant. In *2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)*, pages 976–980. IEEE, 2023.
- [27] Annie Silviya S H, Sriman B, Haffishthullah, and Anwar Basha. Smart hydroponic greenhouse enhanced with the application of the internet of things. *HKIE Transactions*, 31:1–11, 12 2024.
- [28] Joy Samadder, Subhadip Roy, Somnath Mapa, Sagar Gharami, Jadav Chandra Das, and Amit Ghosh. Iot-driven automated hydroponic system for climate-independent indoor crop cultivation. In *2024 IEEE International Conference of Electron Devices Society Kolkata Chapter (EDKCON)*, pages 1–6. IEEE, 2024.
- [29] Keyestudio. Ks0429 keyestudio tds meter v1.0, 2024. Acesso em: 3 dez. 2025.
- [30] Edward Ramsden. *Hall-effect sensors: theory and application*. Elsevier, 2011.
- [31] J Benton Jones Jr. *Hydroponics: a practical guide for the soilless grower*. CRC press, 2016.

- [32] Howard M Resh. *Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower*. CRC press, 2022.

Apêndice A

Revisão Sistemática da Literatura

A Revisão Sistemática da Literatura foi conduzida em três bases de dados (Scopus, IEEE Xplore e ACM Digital Library) utilizando a seguinte string de busca:

```
("hydroponic* monitoring" OR "hydroponic* automation" OR  
"hydroponic* control" OR "automated hydroponic*" OR  
"smart hydroponic*") AND ("sensor*" OR "IoT" OR  
"monitoring system*") AND ("development" OR "design" OR  
"implementation") AND ("automatic*" OR "control system*")  
AND ("NFT" OR "DWC" OR "deep water culture" OR  
"aeroponics" OR "aeroponic*" OR "nutrient film technique")
```

A busca foi limitada a publicações dos últimos 5 anos, resultando em 377 artigos. Inicialmente realizou-se uma triagem por título e resumo, descartando trabalhos que não apresentavam relação com automação ou hidroponia. Após a triagem e remoção de duplicatas, 99 trabalhos foram selecionados para a etapa de garantia de qualidade.

Na etapa de garantia de qualidade, os trabalhos foram avaliados segundo os seguintes critérios:

- O estudo fornece detalhes sobre os dispositivos IoT utilizados (sensores, conectividade, etc.)?
- O sistema de hidroponia utilizado é NFT?

- O estudo apresenta valores padrão ou ideais para os parâmetros medidos?
- O processo de coleta de dados é claramente explicado e adequado para o contexto da hidroponia?
- O estudo apresenta parâmetros de telemetria dos sensores utilizados e/ou métodos de análise de dados?
- O estudo apresenta o sistema e suas funcionalidades?
- O estudo descreve e/ou avalia a resistência dos dispositivos às condições ambientais?
- O estudo discute o custo dos dispositivos IoT e a viabilidade econômica para produtores?
- Há discussão sobre a aplicação dos resultados a outras áreas, configurações ou tipos de sistema hidropônico?

Ao final da etapa de garantia de qualidade, foram selecionados 21 trabalhos que apresentavam implementações práticas de sistemas hidropônicos automatizados com detalhamento técnico adequado dos componentes, sensores, atuadores e tecnologias de comunicação utilizadas.

As Figuras A.1 a A.6 apresentam a análise agregada dos dados extraídos destes trabalhos.

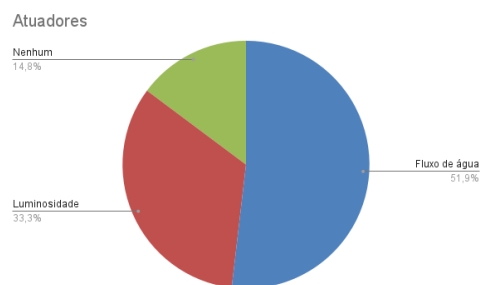


Figura A.1: Atuadores

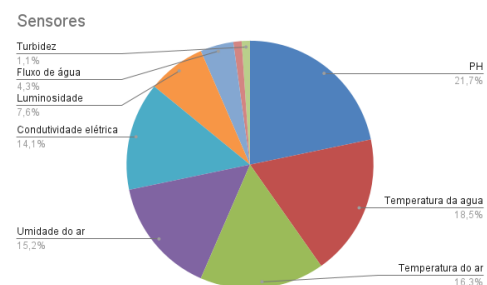


Figura A.2: Sensores



Figura A.3: Protocolos de comunicação

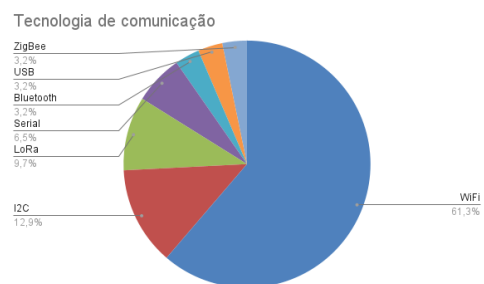


Figura A.4: Tecnologias de comunicação

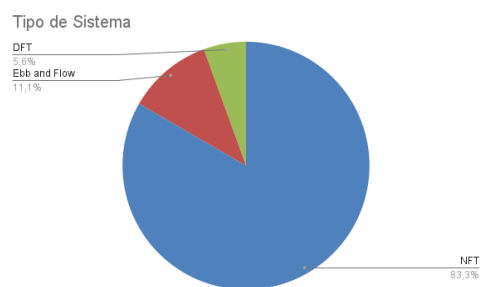


Figura A.5: Tipos de sistema

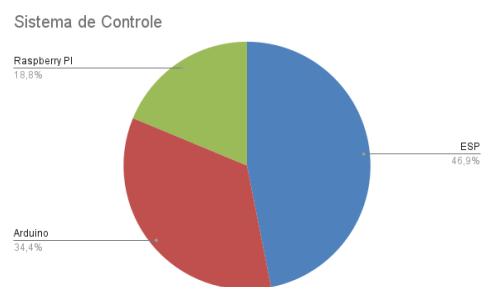


Figura A.6: Sistema de controle

Apêndice B

Custo dos Componentes

Este apêndice detalha os custos de aquisição dos componentes eletrônicos e materiais utilizados na implementação do sistema. Os valores foram levantados em novembro de 2025 dos mesmos fornecedores utilizados para a aquisição dos componentes durante o desenvolvimento deste trabalho, majoritariamente via AliExpress.

A Tabela B.1 apresenta a discriminação dos custos por módulo do sistema, permitindo estimar o investimento necessário para diferentes configurações e escalas de implementação.

Tabela B.1: Custos dos componentes do sistema.

Componente	Valor unitário (R\$)	Quantidade	Total (R\$)
Componentes comuns			
Fonte Hi-Link HLK-PM01	9,34	1	9,34
Relé single srd-05vdc-sl-c	24,15	1	24,15
MH-ET LIVE ESP32 MiniKit	20,22	1	20,22
Optoacoplador PC817 (50pç)	0,16	1	0,16
Resistores (100pç)	0,07	3	0,21
Transistor (100pç)	0,07	1	0,07
Capacitor (50pç)	0,06	1	0,06
Placa de circuito impresso	0,00	1	0,00
Subtotal Componentes Comuns			54,07
Sistema do reservatório			
Sensor de nível XKC-Y25-V	20,52	3	61,56
Sensor de pH PH-4502C	40,79	1	40,79
Sensor DS18B20	4,74	1	4,74
Sensor TDS Meter v1.0	33,90	1	33,90
Subtotal reservatório			140,99
Sistema da bancada			
Sensor DHT22	20,80	1	20,80
Sensor de fluxo YF-S201	13,99	1	13,99
Lampada LED	9,71	1	9,71
Subtotal bancada			44,50
Total por reservatório			195,06
Total por bancada			98,57
Custos extras			
Medidor de pH & EC de bolso KR60	429,00	1	429,00
Mudas de Alfaca Crespa	0,14	9	1,26
Fertilizante Plenar	67,97	1	67,97

Apêndice C

Estimativa de Custo Energético

Este apêndice apresenta o consumo energético estimado para os módulos do sistema. Os valores foram calculados das especificações técnicas dos componentes considerando operação contínua de 24 horas. O custo foi estimado com base na tarifa residencial de R\$ 1,23/kWh.

As Tabelas C.1 e C.2 apresentam o consumo discriminado por componente para os sistemas do reservatório e das bancadas.

Tabela C.1: Consumo energético do sistema do reservatório.

Sistema do reservatório	Corrente (mA)	Potência (W)	Consumo diário (kWh)	Consumo diário (R\$)	Consumo mensal (30 dias)
ESP32	68	0,22	0,005	0,006	0,18
WiFi em pico de transmissão	240	0,79	0,019	0,02	0,64
Sensor de pH	10	0,05	0,001	0,0013	0,04
Sensor de EC	6	0,019	0,00047	0,0005	0,016
Sensor de nível * 3	15	0,049	0,001	0,001	0,04
Relé ativado	71	0,35	0,0085	0,0096	0,28
Sensor de temperatura	1,5	0,0075	0,00018	0,0002	0,006
Total	411,5	1,49	0,03	0,04	1,21

Tabela C.2: Consumo energético do sistema das bancadas

Sistema das bancadas	Corrente (mA)	Potência (W)	Consumo diário (kWh)	Consumo diário (R\$)	Consumo mensal (30 dias)
ESP32	68	0,22	0,005	0,006	0,18
WiFi em pico de transmissão	240	0,79	0,019	0,02	0,64
Sensor de temperatura e umidade	1,5	0,007	0,00018	0,0002	0,006
Sensor de fluxo	15	0,07	0,0018	0,002	0,06
Total	324,5	1,09	0,026	0,029	0,89