



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

Programa de Pós- Graduação em Química



MIGUEL PEREIRA DE ALMEIDA JUNIOR

MONITORAMENTO E CONTROLE AUTOMATIZADO DE pH E CONDUTIVIDADE
DE SOLUÇÕES NUTRITIVAS EM SISTEMA HIDROPÔNICO

Alfenas/ MG
2025

MIGUEL PEREIRA DE ALMEIDA JUNIOR

**MONITORAMENTO E CONTROLE AUTOMATIZADO DE pH CONDUTIVIDADE
DE SOLUÇÕES NUTRITIVAS EM SISTEMA HIDROPÔNICO**

Defesa apresentada como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre em Química pelo Programa de Pós-graduação em Química da Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração Química Analítica. Orientador: Prof. Dr. Pedro Orival Luccas.

Alfenas/MG
2025

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Central

Almeida Junior, Miguel Pereira de.

Monitoramento e controle automatizado do pH e da condutividade de soluções nutritivas em sistemas hidropônicos. Automação e Desenvolvimento Analítico / Miguel Pereira de Almeida Junior - Alfenas, MG, 2025.

99 f. : il. -

Orientador(a): Pedro Orival Luccas.

Dissertação (Mestrado em Química) - Universidade Federal de Alfenas, Alfenas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Hidroponia. 2. PH. 3. EC. 4. Sustentabilidade agrícola. 5. IoT e Sistema NFT. I. Luccas, Pedro Orival, orient. II. Título.

MIGUEL PEREIRA DE ALMEIDA JUNIOR

MONITORAMENTO E CONTROLE AUTOMATIZADO DE PH E CONDUTIVIDADE DE SOLUÇÕES NUTRITIVAS EM SISTEMA HIDROPÔNICO

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Química Analítica

Aprovado em: 28 de julho de 2025.

Prof. Dr. Pedro Orival Luccas
Presidente da Banca Examinadora
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Gian Paulo Giovanni Freschi
Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Profa. Dra. Leticia Malta Costa
Instituição: Universidade Federal de Minas Gerais



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Orival Luccas, Professor do Magistério Superior**, em 28/07/2025, às 11:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#)



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1566602** e o código CRC **9552D430**.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço à Deus que me proporcionou esta oportunidade, que sem ele realmente não teria conseguido chegar até onde imaginei, ele esteve tão próximo da minha realidade em minhas lutas diárias e vitórias como um Pai que cuida de seu filho. Agradeço a minha família de origem, que tanto me apoiou nesse processo, minha mãe Maria Tereza, uma mulher admirável que não se deixou levar pelas perdas mais uma vez, enfrentou com muita garra e determinação a batalha que é criar de forma admirável, que desde sempre busca em dar o melhor aos seus filhos. Aos meus irmãos, Gizele Aparecida, Luiz Felipe, que agradeço a Deus por tê-los em minha vida, também ao meu padrasto Noel. Minhas tias e tio por parte de mãe e pai, primos e primas que considero como irmãos, minha adorável avó Dona Chica que é minha saudade diária. Com gratidão, reconheço a família abençoada que construí junto com minha esposa, Mariana. Ela tem sido minha companheira não apenas na vida acadêmica, mas também no dia a dia, sempre me incentivando a perseguir meus sonhos. A minha filha Melissa, um presente divino, e sua presença me motiva a enfrentar todos os desafios com determinação. Orgulho-me de ser um pai que se dedica à ciência e à busca do conhecimento, também a minha sogra Lilian. Por fim, gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Pedro Orival Luccas, no qual tenho a honra de conhecê-lo e ser orientado por todos os ensinamentos, sábios conselhos e amizade que irei levar por toda a vida. Aos demais professores(as) e colegas do grupo de pesquisa, que por algum momento fizeram parte dessa jornada, minha gratidão.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (FAPEMIG) – Código de Financiamento 001.

RESUMO

A produção de plantas sem solo, denominada hidroponia, é de relevância para a sustentabilidade ambiental e populacional. Dentre os sistemas hidropônicos mais utilizados, o sistema NFT (Técnica de película de nutrientes, do inglês Nutrient Film Technique) se destaca por sua capacidade de fornecer os nutrientes e oxigênio de maneira contínua através de um fluxo laminar de solução nutritiva. A técnica é amplamente utilizada em hortaliças como alface, rúcula e outras plantas de ciclo curto. No presente trabalho, foi construído um minissistema NFT, com capacidade para quatro mudas de alface, que foi alojado dentro de uma capela de fluxo laminar. A automação envolveu a integração de sensores e a calibrações dos mesmo para o monitoramento do pH, condutividade elétrica (CE), temperatura da solução nutritiva (TS), umidade relativa do ar (UR) e temperatura do ambiente da atmosfera?? (TA). Empregou-se também quatro minibombas acopladas a reservatórios de reagentes (H_3PO_4 , KOH, água e solução nutritiva concentrada), para ajuste de pH e condutividade. A solução nutritiva foi preparada com reagentes de grau analítico (P.A.). Durante 30 dias de operação, o sistema conseguiu manter os parâmetros físico-químicos dentro das faixas ideais, $pH = 6,02 \pm 0,13$, $CE = 1,22 \pm 0,07$ mS, $TS = 21,61 \pm 1,16^\circ C$, $TA = 25,67 \pm 1,03^\circ C$, $UR = 56,82 \pm 4,85\%$. A aquisição de dados foi feita empregando-se técnicas remotas de internet das coisas (internet of things IoT), com as planilhas do Google Sheets®, plataforma Blink®, bem como pela saída USB. A automação minimizou desequilíbrios nutricionais, reduzindo intervenção manual e custos operacionais, além de otimizar o uso de água. O sistema mostrou-se uma solução escalável e de baixo custo para a agricultura de precisão, contribuindo para uma produção sustentável e eficiente.

Palavras-chave: Hidroponia, pH, CE Sustentabilidade agrícola; IoT; Sistema NFT.

ABSTRACT

Soilless plant production, hydroponics, is relevant to environmental and population sustainability. Among the most widely used hydroponic systems, the NFT (Nutrient Film Technique) system stands out for its ability to continuously provide nutrients and oxygen through a laminar flow of nutrient solution. This technique is widely used for vegetables such as lettuce, arugula, and other short-cycle plants. In the present work a mini-NFT system with the capacity for four lettuce seedlings was building and housed inside a laminar flow hood. The automation involved the integration and calibration of sensors for monitoring pH, electrical conductivity (EC), nutrient solution temperature (TS), relative humidity (RH), and ambient temperature (AT). Additionally, four mini pumps coupled with reagent reservoirs (HCl, NaOH, water, and concentrated nutrient solution) were employed to adjust pH and conductivity. The nutrient solution was prepared with analytical-grade reagents (P.A.). During 30 days of operation, the system maintained the physicochemical parameters within the ideal ranges: pH = 6.02 ± 0.13 , EC = 1.22 ± 0.07 mS/cm, TS = 21.61 ± 1.16 °C, AT = 25.67 ± 1.03 °C, RH = $56,82 \pm 4,85\%$. Data acquisition was performed using IoT remote techniques through Google Sheets® spreadsheets, Blink® and USB output. Despite issues with power grid instability and uneven growth of some vegetables, likely due to the positioning of the light source, the automated system showed good results, proving its feasibility for precision agriculture. With some adjustments and optimizations, the system can be applied on a large scale, promoting more technological and sustainable agricultural practices.

Keywords: Hydroponics, pH, EC; Agricultural sustainability; IoT; NFT system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Implementação de um sistema NFT	17
Figura 2 -	Levantamento bibliográfico na base de dados Web Of Science entre 2013/2024	21
Figura 3 -	Artigos que relacionam grupos formados pelas palavras-chave hydroponic automated.	22
Figura 4 -	Influência da transformação digital na agricultura brasileira	24
Figura 5 -	Principais tipos de sistemas hidropônicos aplicados na agricultura.	27
Figura 6 -	Disponibilidades de nutrientes em função do pH.	32
Figura 7 -	Arquitetura típica de aplicações IoT.	36
Figura 8 -	Sistema vertical da empresa CoolFarm	37
Figura 9 -	Plataforma de controle	38
Figura 10 -	Reservatórios Inteligentes do Sistema NIDO PRO para Hidroponia Vertical.	39
Figura 11 -	Microcontrolador (ESP 32).	43
Figura 12 -	Primeira versão do protótipo de automatização montado em protoboard	46
Figura 13 -	Gabinete moldado pelo software Autodesk Fusion®	48
Figura 14 -	Gabinete impresso para aquisição dos componentes do sistema automatizado	49
Figura 15 -	Diagrama de Conexão dos Dispositivos no Sistema Hidropônico Automatizado	50
Figura 16 -	Representação esquemática da integração dos componentes no gabinete.....	51
Figura 17 -	Diagrama de blocos do sistema hidropônico proposto	52
Figura 18 -	Diagrama de blocos do segundo microcontrolador	53
Figura 19 -	Fluxograma da Lógica de Controle do Sistema Hidropônico Automatizado.	55

Figura 20 -	Dashboard Criado para monitorar a e aplicar comandos pela plataforma blynk IoT	57
Figura 21-	Sistema NFT automatizado com sensores e controle via IoT para monitoramento e correção de pH e condutividade elétrica.	59
Figura 23 -	Preparo da solução nutritiva com macro e micronutrientes para o sistema NFT.....	60
Figura 24 -	Imagem das mudas de alface posicionadas para inicialização do ciclo de cultivo	61
Figura 25 -	Curva de Calibração do Sensor de Condutividade Elétrica (CE)	63
Figura 26 -	Variações do pH e Acionamento das Bombas Corretivas.	64
Figura 27 -	Variações do CE e Acionamento das Bombas Corretivas.....	64
Figura 28 -	Varição de pH e CE na Primeira semana.....	69
Figura 29 -	Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS).	70
Figura 30 -	Desenvolvimento das hortaliças durante a primeira semana de cultivo em solução nutritiva	71
Figura 31 -	Varição do pH e CE da solução nutritiva ao longo da segunda semana.....	72
Figura 32 -	Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS) ao longo da segunda semana	73
Figura 33 -	Desenvolvimento das hortaliças durante a segunda semana.	74
Figura 34 -	Correção automática de CE e pH na terceira semana.....	76
Figura 35 -	Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS) ao longo da terceira semana.....	78
Figura 36 -	Desenvolvimento das hortaliças durante a terceira semana.....	79
Figura 37-	Varição da CE e pH ao longo da quarta semana.....	81

Figura 38 -	Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS) ao longo da quarta semana.....	82
Figura 39 -	Desenvolvimento das hortaliças durante a quarta semana.....	83
Figura 40 -	Valores de pH 4502C, TDS medidos com equipamentos comerciais durante o primeiro cultivo.	84
Figura 41 -	Retirada das hortaliças do primeiro cultivo, após 30 dias.	85
Figura 42 -	Valores de pH 4502C, TDS medidos durante o segundo cultivo.	86
Figura 43 -	Retirada das quatro mudas no segundo cultivo, após 29 dias.....	87
Figura 44 -	Valores de pH 4502C, TDS medidos com equipamentos comerciais	89
Figura 45 -	Valores medidos dos sensores Ds18b20 e o sensor de temperatura digital em um mês.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Indicações de formulações de solução nutritiva.....	33
Tabela 2 -	Atributos de Operação do Sistema	54
Tabela 3 -	Histórico organizado da chegada dos dados enviados pelo Esp32 no Google Shetts	58
Tabela 4 -	Custo de todos os componentes utilizado pra montagem do sistema automatizado.....	91

LISTA DE ACRÔNIMOS

ADC	Conversor Analógico para Digital (do inglês: <i>Analog-to-Digital Converter</i>)
CPU	Unidade Central de Processamento (do inglês: <i>Central Processing Unit</i>)
EC	Condutividade Elétrica (do inglês: <i>Electrical Conductivity</i>)
DAC	Conversor Digital para Analógico (do inglês: <i>Digital-to-Analog Converter</i>)
DWC	Cultura em Água Profunda (do inglês: <i>Deep Water Culture</i>)
EDTA	Ácido Etilenodiaminotetracético (do inglês: <i>Ethylenediaminetetraacetic Acid</i>)
GND	Terra (Aterramento) (do inglês: <i>Ground</i>)
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês: <i>Global Positioning System</i>)
IDE	Ambiente de Desenvolvimento Integrado (do inglês: <i>Integrated Development Environment</i>)
NFT	Técnica do Filme Nutritivo (do inglês: <i>Nutrient Film Technique</i>)
PLA	Ácido Polilático (do inglês: <i>Polylactic Acid</i>)
PVC	Cloreto de Polivinila (do inglês: <i>Polyvinyl Chloride</i>)
RTC	Relógio de Tempo Real (do inglês: <i>Real-Time Clock</i>)
SAR	Taxa de Absorção Específica (do inglês: <i>Specific Absorption Rate</i>)
SDK	Kit de Desenvolvimento de Software (do inglês: <i>Software Development Kit</i>)
TDS	Sólidos Totais Dissolvidos (do inglês: <i>Total Dissolved Solids</i>)
TE	Tensão de Entrada
TI	Tecnologias da Informação
DLI	Total de luz diária

PPFD	Densidade de fluxo fotossintéticos de fótons
TS	Temperatura da Solução
TA	Temperatura Ambiente
UR	Umidade Relativa do Ar
VCC	Tensão do Coletor Comum (do inglês: Voltage Common Collector)
VPD	Déficit de Pressão de Vapor (do inglês: Vapor Pressure Deficit)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	20
3	REFERENCIAL TEÓRICO	23
3.1	AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	23
3.2	PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E HIDROPONIA.....	24
3.4	TIPOS DE CULTIVO EM HIDROPONIA	26
3.5	NUTRIENTES NECESSÁRIOS.....	29
3.6	SOLUÇÃO NUTRITIVA EFICIENTE E SEU MONITORAMENTO	29
3.6.1	Condutividade Elétrica	30
3.6.2	pH	31
3.6.3	Temperatura	32
3.7	PREPARO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA.....	33
3.7.1	Reposição de Nutrientes	34
3.8	PLACA MICROCONTROLADORA ESP32®.....	34
3.9	INTERNET DAS COISAS (IOT).....	35
3.10	APLICAÇÕES DE AUTOMAÇÃO EM HIDROPONIA	36
3.10.1	Empresas de Horticultura e Engenharia	36
4	OBJETIVOS	41
4.1	OBJETIVOS GERAIS	41
4.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	41
5	MATERIAIS E MÉTODOS	42
5.1	EQUIPAMENTOS E MATERIAIS.....	42
5.2	REAGENTES.....	42
5.3	COMPONENTES.....	43
5.3.1	Microcontroladores	43
5.3.2	Sensores	43
5.3.3	Atuadores	44
5.4	ESTRUTURA DE HARDWARE DO PROTÓTIPO	45
5.5	CALIBRAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DOS SENSORES	47
5.5.1	Sensor de pH	47
5.5.2	Sensor de Condutividade Elétrica (CE)	47
5.5.3	Sensor de Temperatura (DS18B20)	48

5.6	MONTAGEM DO GABINETE E INTEGRAÇÃO DO CIRCUITO.....	48
5.6.1	Diagrama De Conexão dos fios e Hardware	49
5.7	LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO NA IDE DO ARDUINO.....	51
5.8	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NA NUVEM VIA BLYNK E GOGLE SHEET	56
5.8.1	Monitoramento via Blynk IoT	56
5.8.2	Armazenamento de Dados no Google Sheets	57
5.8.3	Criação do Código no Google Sheets:	58
5.9	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NFT	58
5.10	PREPARADO DAS SOLUÇÕES NUTRITIVAS.....	59
5.11	PRÉ-TESTE DE AUTOMAÇÃO	60
5.12	VALIDAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE REAL	61
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
6.1	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES	62
6.1.1	Sensor de pH	62
6.1.2	Calibração da Condutividade elétrica (CE)	62
6.2	PRÉ-TESTE DE AUTOMAÇÃO	63
6.3	LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO NA IDE DO ARDUINO.....	65
6.3.1	Requisitos de Operação e Desempenho	65
6.4	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NA NUVEM VIA BLYNK E GOOGLE SHEETS....	66
6.5	VALIDAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE REAL	67
6.5.1	Primeira Semana	68
6.5.2	Segunda Semana	71
6.5.4	Terceira Semana	75
6.5.5	Quarta Semana	80
6.5.6	Comparativo entre o primeiro e o segundo cultivo: Ajustes no manejo e impacto na fisiologia das plantas.	83
6.5.7	Avaliação dos sensores	88
7	CUSTOS FINAIS DO SISTEMA AUTOMATIZADO	90
8	CONCLUSÕES	92
9	REFERÊNCIAS	93

1 INTRODUÇÃO

A hidroponia é uma técnica de cultivo que se destaca por dispensar o uso de solo, permitindo que as plantas sejam cultivadas em ambientes controlados, com ou sem substrato, onde recebem nutrientes por meio de uma solução aquosa. Apresenta diversas vantagens, como: possibilidade de utilização de áreas impróprias para a agricultura convencional, como solos áridos e degradados conforme Teixeira (1996), independência da cultura às condições climáticas, como veranico, geadas, granizo, vento, inundações e estações climáticas, permitindo o cultivo durante todo o ano conforme Faquin *et al.* (1996), redução no uso de atividades que exigem muita mão de obra, como capina e preparo do solo. Além disso, as atividades em hidroponia também podem ser consideradas mais suaves (Castellane; Araújo, 1994). Segundo Pawar (2019), as plantas não precisam realmente de solo, mas apenas de nutrientes para crescer, pois o solo introduz 90% das pragas. A agricultura convencional passou por melhorias com o avanço e adoção crescente da hidroponia comercial, especialmente em países como Índia, Israel, Brasil, Sudeste Asiático e Itália. Entretanto, de acordo com o Relatório Global do Mercado de Hidroponia, as perdas de produção ainda persistem: entre 10 e 16% do fracasso global nas colheitas são atribuídos a pragas (Pawar, 2019).

No Brasil, o cultivo hidropônico se expandiu consideravelmente, a partir da década de 1990, impulsionado pelo trabalho de pioneiros como Shiguero Ueda e Takanori Sekine (Rodrigues, 2002). Desde então, diferentes sistemas hidropônicos foram desenvolvidos e adaptados às condições locais, sendo os mais utilizados o sistema de Fluxo Laminar de Nutrientes (NFT), o sistema de Leito Flutuante (DWC), o sistema de Pávio, o Fluxo e Refluxo (Ebb e Flow), o sistema de Gotejamento e o sistema Aeropônico (Ecocenter, 2023). Cada um desses sistemas possui características específicas, quanto à maneira como a solução nutritiva é fornecida às plantas e ao nível de controle necessário para seu funcionamento.

De acordo com Ryder e Whitaker (1976), a alface (*Lactuca sativa* L.) provavelmente teve origem no sul da Europa e na Ásia Ocidental. Após sua expansão pelo continente europeu, foi introduzida nas Américas, consolidando-se como uma das hortaliças mais amplamente cultivadas no mundo, conforme relatado por Medina *et al.* (1982). No Brasil, a área destinada ao cultivo de alface passou de cerca de 35 mil hectares, conforme Sala e Costa (2005), para aproximadamente 86,8 mil hectares, conforme dados de 2022 da Revista Campo e Negócios, um crescimento expressivo que evidencia o fortalecimento da produção nacional.

Por outro lado, o cultivo hidropônico acarreta algumas desvantagens, como o alto custo de instalação dos sistemas conforme Faquin *et al.* (1996); a necessidade de monitoramento contínuo da operação do sistema, especialmente o fornecimento de energia elétrica e o controle da solução nutritiva a necessidade de mão de obra especializada e assistência técnica descrito por Sanchez (1996), bem como novos produtos e técnicas adequadas para o controle de pragas e doenças, pois os pesticidas convencionais podem diminuir a qualidade biológica do produto (Teixeira, 1996). Portanto, é essencial consultar especialistas técnicos para a concepção dos projetos, sejam eles de universidades e/ou consultores experientes, considerando o custo e a complexidade do projeto (Sanchez, 1996).

Um dos avanços mais significativos para a consolidação da hidroponia em escala comercial foi a introdução da técnica NFT (*Nutrient Film Technique*), desenvolvida por Allen Cooper em 1965 (Jones Júnior, 1983). Conforme descrito por Bernardes (1997), o método NFT consiste em cultivar plantas em um ambiente com circulação constante de solução nutritiva – composta por água e nutrientes – dentro de canais de paredes impermeáveis, onde as raízes permanecem parcialmente submersas. Apesar da ampla adoção, muitos cultivos hidropônicos fracassam, sobretudo por deficiências no fornecimento nutricional, uma vez que esse sistema requer um preparo adequado e um manejo rigoroso das soluções nutritivas. O sucesso desse sistema depende diretamente da automação, já que o controle preciso das variáveis físico-químicas, como pH e condutividade elétrica (CE), é fundamental para a saúde das plantas.

Garantir a oferta adequada de nutrientes é um princípio básico na produção de hortaliças, seja em cultivo convencional no solo ou em sistemas hidropônicos. As plantas necessitam de dezesseis elementos essenciais ao seu crescimento e desenvolvimento: carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, fósforo, potássio, enxofre, cálcio, magnésio, manganês, ferro, zinco, boro, cobre, molibdênio e cloro. Esses elementos são classificados segundo sua origem em orgânicos (C, H, O) e minerais, sendo os minerais subdivididos em macronutrientes e micronutrientes (Malavolta, 2006). Na Figura 1, pode-se observar uma cultura de alface cultivada pelo sistema NFT, onde a planta é diretamente suprida por uma solução nutritiva rica nesses elementos.

Figura 1- Implementação de um sistema NFT



Fonte: NosoilSolutions (2024).

Um dos fundamentos essenciais para o cultivo de hortaliças, seja em solo ou em sistemas hidropônicos, é garantir o fornecimento completo de todos os nutrientes necessários ao pleno desenvolvimento das plantas. A distinção entre macro e micronutrientes está fundamentada na quantidade exigida por cada elemento ao longo do ciclo de vida da planta. Cerca de 90 a 95% da massa seca vegetal é composta por carbono (C), hidrogênio (H) e oxigênio (O), elementos amplamente disponíveis na água e no ar. Por esse motivo, a atenção principal recai sobre os nutrientes minerais, que devem ser fornecidos em solução, especialmente em sistemas hidropônicos, onde o solo é substituído por um meio nutritivo controlado. Em hidroponia, a absorção desses nutrientes tende a acompanhar sua concentração na zona radicular, sendo influenciada por fatores ambientais como temperatura, salinidade, pH, oxigenação, condutividade elétrica da solução, intensidade e duração da luz e umidade relativa do ar (Furlani *et al.*, 1999). Cada nutriente exerce funções específicas no metabolismo vegetal, e tanto sua deficiência quanto o excesso podem provocar sintomas distintos nas plantas.

A nutrição mineral exerce papel central na qualidade e no rendimento da alface. A aplicação equilibrada dos nutrientes é essencial para garantir a qualidade comercial do produto (Abou-Hadid *et al.*, 1996). Embora a alface requiera menor quantidade de nutrientes em comparação com outras culturas, ainda é considerada exigente, sobretudo nas fases finais do seu desenvolvimento (Goto *et al.*, 2001).

Como a CE está diretamente relacionada à quantidade de íons na solução, sua diminuição representa menor disponibilidade de nutrientes para as raízes. Cada uma dessas espécies nutrientes possui uma janela de atividade iônica dentro da qual o crescimento é

otimizado (Bamsey *et al.*, 2012). Embora menos frequentemente considerada nas práticas industriais de cultivo em estufas, a atividade iônica está diretamente relacionada à concentração efetiva dos íons em solução e representa o parâmetro fundamental mais relevante no que diz respeito à nutrição vegetal (Crnogorac, 1973). Embora isso forneça algumas informações sobre os íons nutrientes presentes na solução, a CE é uma medida indiscriminada para a composição total de nutrientes e não diferencia entre as espécies de nutrientes presentes (Bailey *et al.*, 1988; Albery *et al.*, 1985). A atividade é a "concentração efetiva" de uma determinada espécie em uma solução. Além do efeito indireto que o pH tem sobre a CE ao induzir reações de precipitação/dissolução, como H^+ e OH^- contribuem de forma diferente para a CE da solução, as mudanças de pH podem influenciar as medições de CE (Shackelford *et al.*, 1985).

Embora sistemas automatizados não estejam sujeitos a falhas decorrentes de cansaço ou desatenção humana, garantindo maior padronização e confiabilidade na produção, muitos sistemas ainda não valorizam a precisão dos dados gerados por sensores nem avaliam a qualidade do controle realizado pelos atuadores. Uma análise da (organização das Nações Unidas para a Alimentação), segundo Fao (2022), destaca que a eficácia da automação digital depende diretamente da confiabilidade dos sensores e da tomada de decisão automatizada, elementos fundamentais para a sustentabilidade e resiliência dos sistemas agrícolas.

Dentre os setores mais dinâmicos da agricultura atual, destacam-se a engenharia de estufas e a hidroponia, áreas fortemente integradas e em rápido crescimento. A automação, aliada ao uso de tecnologias inteligentes como IoT (Internet das Coisas), *big data* e sistemas de controle, tem sido a base dessa evolução. Em sistemas hidropônicos, o controle automatizado e a instrumentação avançada permitem aprimorar a produtividade e a qualidade das culturas.

No entanto, a eficácia desses sistemas depende crucialmente da qualidade dos dados capturados pelos sensores e da capacidade das decisões enviadas aos atuadores. Além disso, o monitoramento contínuo gera quantidades massivas de dados que precisam de processamento robusto normalmente em plataformas de *cloud computing* e com ferramentas de *big data* e inteligência artificial para extrair *insights* úteis, como alertas precisos ou ajustes em tempo real de irrigação, iluminação ou nutrição. Essa combinação entre *IoT*, *big data* e automação oferece uma abordagem verdadeiramente inteligente para a hidroponia e o cultivo protegido, permitindo decisões baseadas em dados, respostas rápidas a variações ambientais e uma produção mais eficiente, sustentável e escalável.

Diante desse contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema hidropônico do tipo NFT (*Nutrient Film Technique*) e automatizá-lo utilizando programa em

linguagem C++ e microcontroladores ESP32®. A integração de sensores, módulos relés e plataformas de Internet das Coisas (IoT) permitirá o monitoramento e controle automatizado das variáveis críticas do sistema, como pH, condutividade elétrica (CE), temperatura da solução nutritiva (TS), umidade e temperatura ambiente em estufa durante todo o ciclo de cultivo de alface. Parâmetros importantes, incluindo variáveis climáticas, foram considerados pelos efeitos dinâmicos na regulação da solução nutritiva. Isso garantirá uma operação eficiente e precisa, reduzindo a necessidade de intervenção humana contínua.

Além disso, a solução nutritiva foi cuidadosamente preparada com reagentes de grau analítico (P.A.) para garantir a qualidade e a estabilidade dos nutrientes fornecidos às plantas. A automação, desses processos, visa proporcionar maior praticidade ao cultivador, aumentar a autonomia do sistema e otimizar o cultivo hidropônico em ambientes controlados, melhorando tanto a produtividade quanto a eficiência no uso dos recursos disponíveis.

2 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

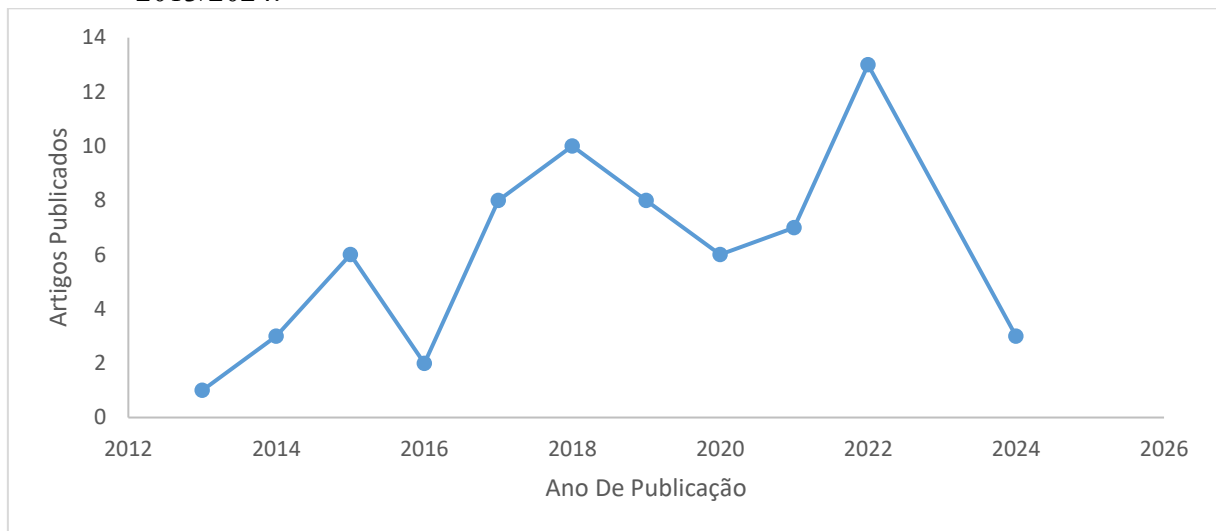
Foi utilizado o método de análise bibliográfica quantitativa conhecido como bibliometria, que fornece dados sobre as atuais tendências de pesquisa científica conforme (Su; Lee, 2010).

Para a realização deste estudo, foi feito um levantamento de artigos na base de dados Web of Science, utilizando o termo “*hydroponic*” como palavra-chave principal. A busca foi delimitada ao período entre 2013 e 2024 e foram considerados apenas os artigos que apresentavam, no título, resumo ou palavras-chave, alguma associação com temas relacionados à automatização, Internet das Coisas (IoT), sistemas NFT, sensores, Arduino, pH e condutividade elétrica.

Inicialmente, foram encontrados 4320 artigos que mencionavam a palavra “hydroponic”. Para o refinamento da amostra, além das palavras-chave relacionadas ao tema, foi adotado como critério de categorização a seleção das áreas específicas dentro da própria plataforma *Web of Science*, com destaque para a área de Química Analítica e demais áreas científicas correlacionadas à temática da pesquisa, como Engenharia Agrícola, Engenharia Elétrica, Agricultura Sustentável, Ciência de Alimentos, Tecnologia de Sensores, entre outras. Essa categorização teve como objetivo garantir que os trabalhos selecionados estivessem diretamente alinhados com o foco do presente estudo, que integra fundamentos da hidroponia com a química analítica em um contexto tecnológico.

Após a aplicação desses filtros, foram selecionados 67 artigos que apresentavam conexão direta com os objetivos da pesquisa. Esses trabalhos foram analisados quanto à distribuição temporal das publicações, resultando na construção de um gráfico representado na Figura 2, que mostra que o ano de 2022 concentrou o maior número de publicações, totalizando 13 artigos, o que representa cerca de 19% do total selecionado. Essa concentração demonstra um aumento progressivo no interesse pelo tema, evidenciando sua atualidade e relevância no meio acadêmico, especialmente no desenvolvimento de tecnologias voltadas para a automação de sistemas hidropônicos com controle de parâmetros físico-químicos como pH, condutividade e temperatura.

Figura 2 - Levantamento bibliográfico na base de dados Web Of Science entre 2013/2024.



Fonte: Autor

A análise bibliométrica também foi aprofundada com o uso do software VOSviewer®, que permitiu a construção de uma rede de concorrência e um mapa de densidade das palavras-chave extraídas dos 67 artigos. Foram identificadas 36 palavras-chave, das quais foram destacadas aquelas que apareciam em pelo menos três trabalhos. A Figura 3 apresenta a organização dessas palavras em quatro grupos temáticos distintos, representados por cores diferentes. No centro do mapa, destaca-se a palavra “*hydroponics*” com maior intensidade, evidenciando sua relevância nas conexões com outras palavras-chave como *automation*, IoT, pH e sensor.

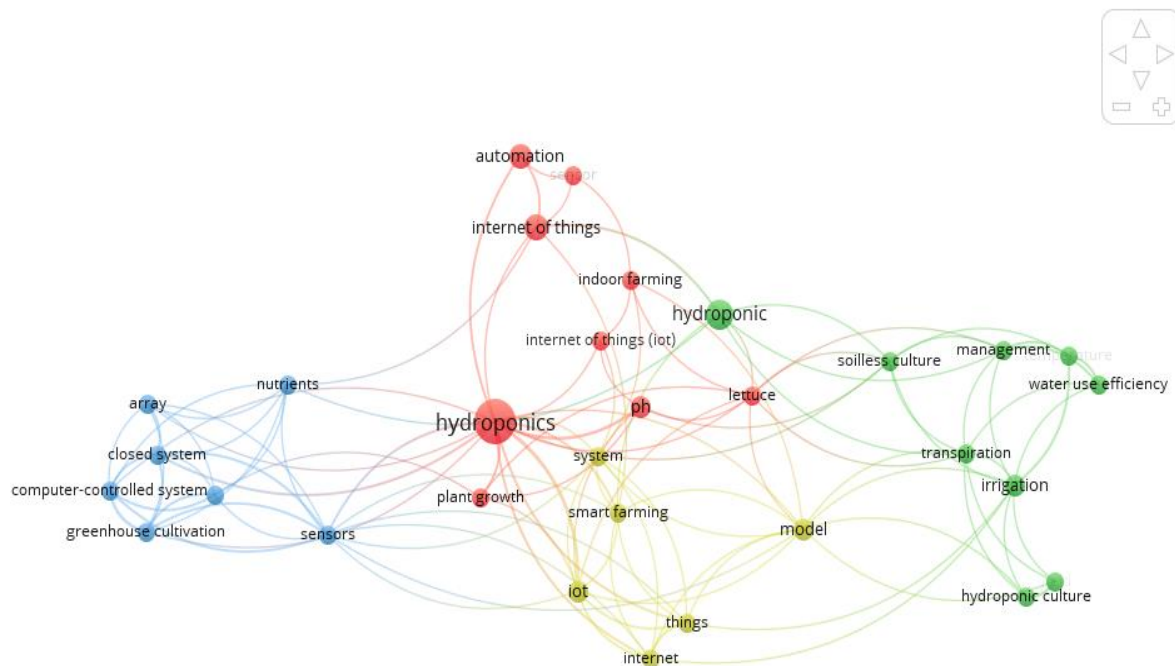
No grupo 1, vermelho, nove itens compartilham das mesmas palavras que definem os artigos como: automation, hidroponics, indoor farming, internet of things (IoT), lettuce, pH, plants growth, sensor.

No grupo2 verde (hydroponics, hydroponics culture, irrigation, management, soilless culture, temperature, transpiration, water use efficiency, yield).

No grupo 3 azul (array, closet system, computer-controlled system, greenhouse, ion-selective electrodes, nutrients, sensor).

No grupo 4 amarelo (internet, IoT, model, smart farming, system, things)

Figura 3 - Artigos que relacionam grupos formados pelas palavras-chave hydroponic automated.



Fonte: Autor (2024).

Ao analisar o Grupo 1 (vermelho), observa-se que a palavra "hydroponics" se destaca pelo tamanho da esfera, indicando a força do tema dentro do grupo e sua conectividade com outras palavras-chave. Esse destaque evidencia a importância do tema dentro do conjunto de estudos analisados.

No Grupo 1, que serve de base para a estruturação da hipótese deste trabalho, focada na automação de um sistema hidropônico para correção do pH e da condutividade elétrica em sistemas NFT, foram analisados 67 artigos publicados entre 2013 e 2024. Os dados demonstram que esse tema tem crescido em relevância, incentivando novas pesquisas e propostas para a automatização e controle de parâmetros físico-químicos na Hidroponia e na área de Química Analítica.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

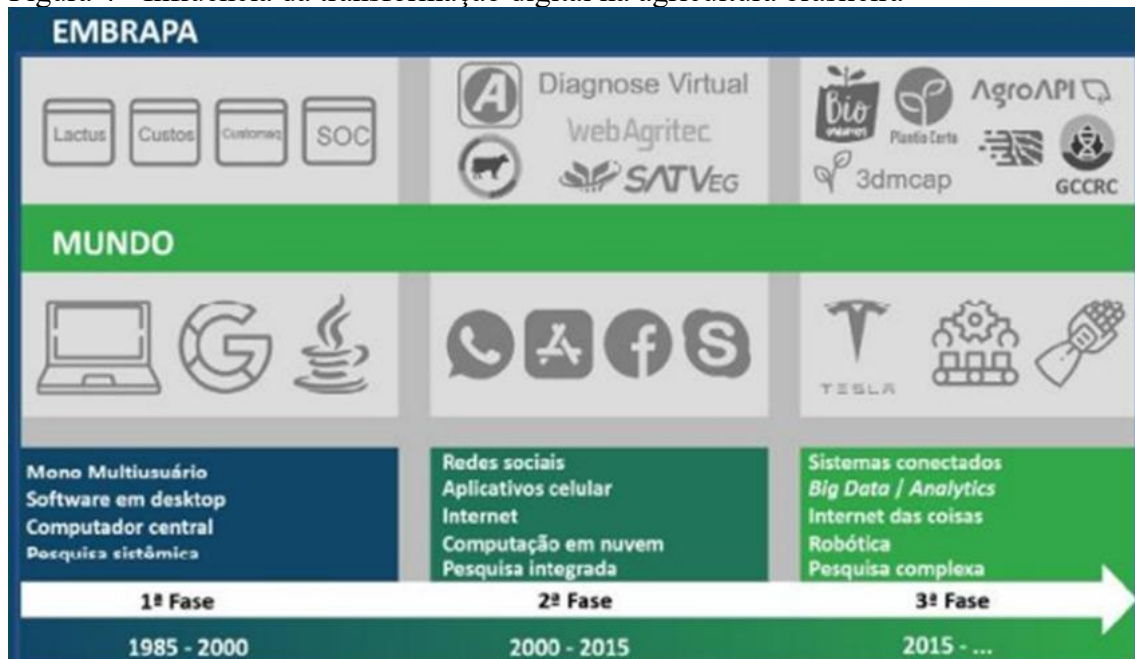
3.1 AGRICULTURA DE PRECISÃO

A agricultura de precisão é uma das áreas mais inovadoras da agricultura moderna. Seu desenvolvimento começou por volta de 1990, com a integração da tecnologia GPS, que automatizou as rotas dos tratores utilizados nas plantações. Esse avanço garantiu maior eficiência no campo, eliminando sobreposições e evitando que partes da área fossem negligenciadas durante a operação das máquinas (Dos ramos, 2019).

Inicialmente (Figura 4), os sistemas eram projetados para funcionar exclusivamente em desktops, com uso limitado a um único usuário. Posteriormente, surgiu a internet voltada para a agricultura, permitindo o acesso a ferramentas em dispositivos móveis. Na terceira etapa, a digitalização avançou significativamente, trazendo maior eficiência e conectividade às atividades agrícolas (Embrapa, 2024).

Essa abordagem faz uso das Tecnologias da Informação (TI) para estabelecer um processo de cultivo mais equilibrado, no qual as plantas recebem exatamente o necessário para seu desenvolvimento. Isso resulta em maior produtividade, redução de custos, economia de tempo e esforço na produção. Além disso, a técnica contribui para a diminuição da poluição ambiental, como a dos solos e dos lençóis freáticos. Segundo Rubens, (2022), isso se deve ao controle preciso do uso de insumos, como fertilizantes e soluções nutritivas, evitando excessos que poderiam ser carregados para o ambiente por meio da lixiviação. A aplicação eficiente dos nutrientes, baseada em dados obtidos por sensores, reduz o risco de acúmulo de sais no solo e a contaminação da água subterrânea, promovendo um manejo mais sustentável.

Figura 4 - Influência da transformação digital na agricultura brasileira



Fonte: Embrapa (2024).

3.2 PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E HIDROPONIA

No final do século XX, a discussão sobre os modelos de agricultura ganhou relevância crescente, impulsionada pelas limitações do modelo produtivista convencional nos países capitalistas e pelo colapso dos sistemas agrários coletivistas. Os agricultores mais inseridos no mercado foram os mais afetados pelas oscilações de oferta e demanda, agravadas pelas crises ambientais e econômicas (Silva, 1999).

Paralelamente, o aumento da consciência ambiental e da preocupação com a saúde humana tem provocado uma mudança nos hábitos de consumo, com os consumidores cada vez mais exigentes quanto à procedência e à qualidade dos alimentos. Existe uma relação cada vez mais estreita entre alimentação, saúde e meio ambiente, com preferência por produtos livres de contaminantes, especialmente resíduos de agrotóxicos (Menegaes *et al.*, 2015).

A hidroponia é reconhecida como uma prática agrícola sustentável por promover o uso racional da água e reduzir a necessidade de defensivos agrícolas. Derivado das palavras gregas "hidro" (água) e "ponia" (trabalho), o sistema hidropônico substitui o solo por uma solução aquosa contendo os minerais essenciais às plantas, conforme descrito por Graves (1983), Jensen e Collins (1985) e Resh (1996). Segundo Andriolo *et al.* (2004), o sistema hidropônico do tipo NFT consome cerca de 10% da água utilizada na agricultura convencional, uma vez que opera em circuito fechado e reutiliza a solução nutritiva. No Brasil, predomina o sistema NFT,

refletindo o interesse crescente pela hidroponia. Segundo Silva, Oliveira e Santos (2024), a implementação de técnicas de monitoramento de soluções nutritivas na hidroponia pode melhorar significativamente a produtividade e a qualidade das culturas, por se tratar de cultura de manejo mais fácil e por ser de ciclo curto (45 a 60 dias) garantindo assim retorno de capital rápido.

Outro aspecto sustentável da hidroponia é sua capacidade de otimizar o uso de nutrientes e aumentar a produtividade em áreas reduzidas, especialmente em regiões urbanas. A composição da solução nutritiva pode ser ajustada com base nas exigências específicas da cultura, promovendo o crescimento de plantas mais vigorosas e com maior valor nutricional (Gualberto *et al.*, 1999). A automatização do monitoramento de parâmetros como pH e condutividade elétrica permite intervenções rápidas e precisas, garantindo eficiência no consumo de insumos e menor impacto ambiental (Nielsen, 1984; Resh, 2012). Dessa forma, a hidroponia se consolida como uma alternativa viável para uma agricultura mais sustentável, tecnológica e resiliente.

Em regiões ou períodos quentes do ano, onde as temperaturas do ar podem atingir frequentemente valores entre 35 e 40°C durante várias horas do dia, a temperatura da solução nutritiva tem sido um dos entraves para a produção hidropônica de hortaliças nos períodos quentes do ano. Níveis elevados da temperatura da solução nutritiva, diminuem a solubilidade de oxigênio causando hipoxia e são uma das causas da redução no crescimento ao longo do cultivo. Um segundo fator limitante tem sido o elevado consumo de energia elétrica empregada para a circulação da solução nutritiva em intervalos curtos de tempo, geralmente de 15 minutos, por meio de motobombas (Nogueira *et al.*, 2000).

O controle de nutrientes na solução nutritiva através de um sistema automático foi proposto por Nielsen (1984), com base no ajuste do nível de água, da concentração de nutrientes e do pH, uma vez que a queda na concentração de sais em uma solução nutritiva está correlacionada com a diminuição da condutividade elétrica (CE), sendo um indicador direto da quantidade de íons dissolvidos na solução (Fao, 2013; Resh, 2012). Os níveis de nutrientes podem ser mantidos pela adição de soluções de manutenção, que devem conter os nutrientes nas proporções adequadas para o desenvolvimento da cultura.

A definição das proporções ideais de nutrientes em uma solução nutritiva pode ser feita com base na quantidade média que a planta absorve durante seu desenvolvimento. Esse valor médio de absorção está diretamente relacionado à composição elementar encontrada na massa seca da planta — ou seja, na parte que permanece após a evaporação da água. Para Marschner (2012), a análise da massa seca permite identificar quais nutrientes são exigidos em maiores ou

menores quantidades, servindo como referência para ajustar a formulação da solução nutritiva de forma equilibrada. Essa abordagem é essencial para garantir o suprimento adequado dos elementos essenciais e otimizar o crescimento e a produtividade vegetal, evitando tanto deficiências quanto excessos que possam comprometer o desenvolvimento da planta ou o meio ambiente. Essa composição reflete os elementos essenciais que a planta acumula durante o crescimento. As principais vantagens da NFT são a utilização de cerca de 10% do volume de águas que o cultivo convencional em solo descrito por Andriolo *et al.* (2004), uma maior produtividade, eficiência e maior rendimento por metro quadrado. (Genuino, 2018).

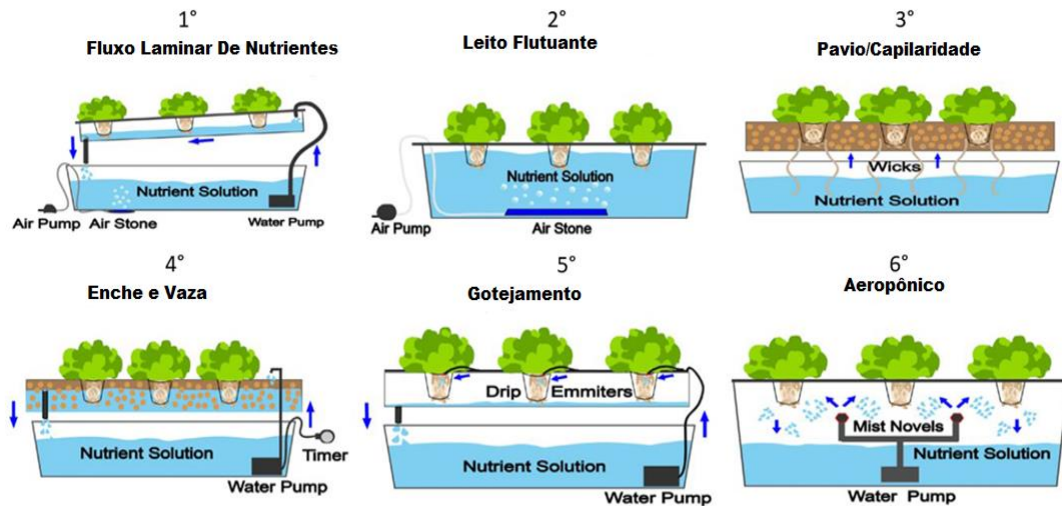
A solução nutritiva pode ser ajustada de acordo com as necessidades específicas de cada cultura, garantindo o fornecimento balanceado de macro e micronutrientes em todas as fases do desenvolvimento vegetal. Isso resulta em plantas mais saudáveis e vigorosas, pois evita tanto deficiências quanto excessos nutricionais, fatores que comprometem a fisiologia e o crescimento das plantas (Gualberto *et al.*, 1999).

3.4 TIPOS DE CULTIVO EM HIDROPONIA

Existem vários sistemas de cultivo hidropônico que diferem entre si quanto à forma de sustentação da planta (meio líquido e substrato), ao reaproveitamento da solução nutritiva (circulantes ou não circulantes), ao fornecimento da solução nutritiva (contínua ou intermitente) (Ufrib, 2007).

Os sistemas hidropônicos são classificados em abertos e fechados, sendo que no sistema aberto a solução nutritiva é aplicada uma única vez às plantas, enquanto que no sistema fechado a solução nutritiva é aplicada e recuperada periodicamente, com correção por adição de água ou de nutrientes minerais. Diferentes tipos de sistemas hidropônicos são descritos na literatura e todos eles têm um aspecto em comum, Figura 5 mostra os principais tipos de sistemas hidropônicos.

Figura 5 - Principais tipos de sistemas hidropônicos aplicados na agricultura.



Fonte: Adaptada de NosoilSolutions.

Lorenzo e Maynard (1988) destacam que o sistema de fluxo laminar de nutrientes NFT (Nutrient Film Technique) é o método mais conhecido de cultivo hidropônico, onde a solução nutritiva é bombeada de um reservatório para um canal, de forma intermitente, e passa pelas raízes das plantas geralmente, é realizado em canaletas, calhas, canais ou outros tipos de estruturas que permitem a passagem da solução onde as raízes das plantas irão se desenvolver (Faquin *et al.*, 1996).

Sistemas de Leito Flutuante DWC do inglês (*Deep Water Culture*). Nesse sistema as plantas são mantidas em plataforma flutuante, colocada diretamente na superfície da solução de nutrientes, usualmente empregam-se placas de poliestireno (isopor) com furos, onde se colocam as plantas, contida num reservatório onde raízes ficam total ou parcialmente imersas nessa solução. O bombeamento proporciona a respiração das raízes por meio de recirculação periódica da solução (Neto *et al.*, 2012).

Sistema hidropônico de Pavio/Capilaridade do inglês *Wick Systems*: Este sistema é um mais simples de todos eles. A solução nutritiva é absorvida e conduzida para as raízes das plantas por capilaridade, através de um ou mais pavios. Com o passar do tempo os sais minerais vão-se acumulando no pavio e tem tendência a perder o seu efeito. Uma solução para este

problema é ter uma abertura suficientemente grande no fundo da cama de cultivo que permita que as raízes cresçam diretamente para a solução nutritiva (Gillani, S. A *et al.*, 2023).

Sistema Fluxo e refluxo do inglês *Ebb e Flows* as plantas são cultivadas em uma bandeja que é regularmente inundada com solução nutritiva em horários predefinidos ao longo do dia. A solução é bombeada de um reservatório para a bandeja de cultivo, onde o líquido é mantido em um nível específico (por meio de um dreno de transbordamento) por um período determinado antes que a bomba seja desligada, permitindo que a solução nutritiva drene de volta pelo tubo de entrada. (Daud *et al.*, 2018).

Sistema Gotejamento do inglês *Drip systems*: Este Sistema é simples e com resultados muito satisfatórios. A solução nutritiva é retirada do reservatório por uma bomba, controlada por um temporizador. Depois de bombeada a solução nutritiva é conduzida através de tubos e microtubos até a planta A solução é depois descarregada na forma de gotas, por meio de pequenos dispositivos referidos como gotejadores. Este sistema tem a vantagem de permitir uma boa oxigenação em volta das raízes, deve se ter o cuidado de ir inspecionando os gotejadores regularmente para impedir o seu entupimento (Ecocenter, 2023).

Sistema hidropônico aeropônico do inglês *aeroponics*, utiliza-se uma névoa fina para fornecer nutrientes às raízes das plantas em que a aspersão da solução de nutrientes deve ser feita por nebulizadores ultrassônicos a uma frequência de aproximadamente (2MHz). A névoa pulveriza as raízes das plantas que ficam suspensas e imersas numa câmara de cultivo, assim, as plantas absorvem água e nutrientes literalmente do ar e é daqui que vem o significado de Aeropônia (Ecocenter, 2023).

Os sistemas hidropônicos são alocados em casas de vegetações e/ou estufas, as quais são ambiente controlados e adequados para se realizar o plantio e o cultivo. Determinando qual o sistema será implementado, o controle e o monitoramento desses processos manuais devem ser feitos diariamente, como por exemplo, ligar e desligar uma bomba de circulação da solução nutritiva, medir e ajustar pH, temperatura e condutividade elétrica, e se possível medir a concentração de nutrientes, o qual pode ser estimado através da medida de condutividade elétrica. Devido a esta grande demanda de controle, tais processos podem ser automatizados, levando praticidade ao cultivador e autonomia do sistema.

3.5 NUTRIENTES NECESSÁRIOS

A água de fontes naturais, ou da rede de abastecimento, não contém os nutrientes necessário para as plantas. Os nutrientes dividem-se em categorias, alguns nutrientes são necessários em maior quantidade em relação a outros (Dos ramos, 2019).

De acordo Cariljo *et al.* (2000), as plantas necessitam de 16 elementos, dos quais 13 são nutrientes minerais. Os macros nutrientes são: o nitrogênio (N), o fósforo (P), o potássio (K), o cálcio (Ca), o magnésio (Mg) e o enxofre (S). Os micronutrientes são: o boro (B), o cloro (Cl), o cobre (Cu), o ferro (Fe), o manganês (Mn), o molibdênio (Mo) e o zinco (Zn). Além dos macros e micronutrientes minerais, a planta necessita do carbono (C), do hidrogênio (H) e do oxigênio (O), que são providos pelo ar e pela água.

3.6 SOLUÇÃO NUTRITIVA EFICIENTE E SEU MONITORAMENTO

A solução nutritiva, utilizada em hidroponia, é fundamental ao desenvolvimento das plantas. Se manejada de forma incorreta provoca redução na produtividade e na qualidade do produto. Dessa forma, vários cultivos hidropônicos são legados ao fracasso em função do desconhecimento do manejo nutricional (Furlani *et al.*, 1999).

As plantas possuem uma notável capacidade de adaptação a diferentes soluções nutritivas, graças à seletividade no processo de absorção. No entanto, é fundamental observar os limites de pH, a pressão osmótica e a proporção adequada entre os nutrientes para evitar que um interfira na absorção do outro ou que ocorra a precipitação de compostos insolúveis. A manutenção de um meio favorável ao desenvolvimento das plantas, não envolve apenas a escolha de uma solução apropriada no plantio, mas do controle contínuo, o qual determinará a adição de sais, ajuste de pH e substituição periódica de toda a solução (Martinez, 2002).

Uma solução ideal é aquela que fornece à planta todos os nutrientes necessários de forma que ela possa absorvê-los com facilidade. As características essenciais de uma boa solução incluem condutividade elétrica, pH e temperatura adequadas. Essas condições variam conforme a espécie de planta, sendo fundamental adotar cuidados específicos para cada tipo de cultivo.

O pH da solução nutritiva é um fator crucial para a disponibilidade e absorção dos nutrientes pelas plantas. Mesmo que os nutrientes estejam presentes na solução, valores inadequados de pH podem comprometer sua absorção, uma vez que afetam a solubilidade e a forma química dos íons disponíveis. De maneira geral, a faixa ideal de pH para a maioria das espécies cultivadas em sistemas hidropônicos situa-se entre 5,5 e 6,5, intervalo no qual a maioria dos macros e micronutrientes se encontra em sua forma mais assimilável. Fora dessa

faixa, certos nutrientes, como ferro, fósforo, manganês e boro, tornam-se menos disponíveis ou até mesmo insolúveis, resultando em deficiências nutricionais mesmo em soluções aparentemente completas (Savvas; Passam, 2002).

3.6.1 Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica (CE) representa a capacidade de um material de conduzir eletricidade. No caso da água pura, essa condutividade é praticamente inexistente, mas aumenta à medida que a quantidade de sais (nutrientes) é aumentada.

Cada planta possui uma faixa ideal de CE, níveis elevados podem dificultar a absorção de nutrientes, enquanto níveis muito baixos comprometem a saúde e a produtividade das plantas. Em sistemas hidropônicos, a CE é medida diretamente na solução nutritiva, utilizando-se a unidade Siemens (S) como referência (Klaassen, 2012).

Durante o crescimento das plantas, a concentração dos nutrientes na solução nutritiva se altera devido à absorção dos elementos essenciais. O ideal é que esses níveis permaneçam constantes para evitar deficiências nutricionais. Apenas a análise química da solução pode indicar a quantidade exata de nutrientes a serem repostos, mas a construção de laboratórios equipados para análise, nem sempre é viável. Assim, a concentração total de sais é estimada por meio da medição da CE com um condutivímetro. A leitura deve ser realizada após completar e homogeneizar o volume da solução. Correções na concentração, como a adição de sais, devem ser feitas sempre na manhã seguinte para garantir o equilíbrio da solução (Carijo *et al.*, 2000).

Uma das maiores desvantagens da condutividade elétrica é não permitir a medição seletiva de nutrientes na solução. Ou seja, se houver falta de apenas um nutriente, o valor que será obtido não mostrará essa falta. O fornecimento de micronutrientes, como já descrito anteriormente, é muito pequeno em relação aos macronutrientes, por isso não têm um efeito significativo na CE (Asao, 2012).

A CE é também modificada pelas plantas, dado que estas tanto absorvem quanto liberam íons para a solução nutritiva. De um modo geral, a CE inicial da solução nutritiva deve estar entre 1,5 mS/cm e 3,0 mS/cm, dependendo principalmente da espécie vegetal. Para a cultura da alface, por exemplo, esse valor deve ser de 1,2 a 2,5 mS/cm, para o tomateiro de 2,5 a 3,0 mS/cm conforme (Furlane, 1998). Assim como a condutividade elétrica, o pH é também uma variável muito importante na hidroponia.

3.6.2 pH

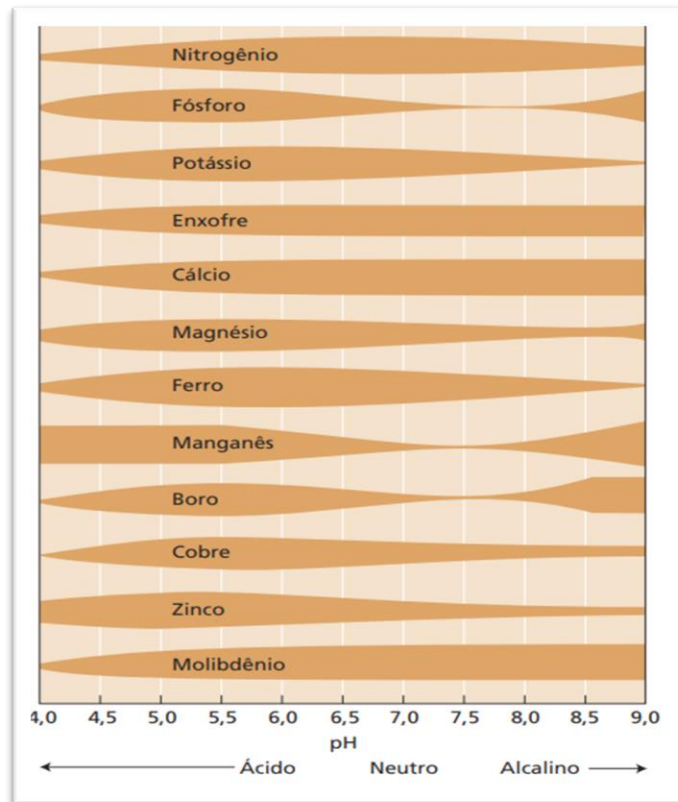
Na hidroponia, o pH está relacionado com a capacidade das plantas conseguirem absorver os diferentes nutrientes. O pH sofre alterações não apenas pelos nutrientes, mas também em resultado dos excrementos das plantas. As plantas, através de um processo chamado de alcalinidade fisiológica libertam íons de modo a equilibrar a carga que se encontra no seu interior (Asao, 2012).

O pH da solução nutritiva varia em decorrência da absorção de nutrientes. Por exemplo, o aumento da absorção de nitratos (NO_3^-) pode levar a um aumento do pH da solução, isso acontece porque a planta, para manter o balanço iônico da membrana celular, libera o ânion OH^- na solução. O mesmo não ocorre com a absorção de K^+ e NH_4^+ , que é feita com a liberação do cátion H^+ o que diminui o pH. As mudanças são mais rápidas no sistema NFT e em lâ-de-rocha, do que em outros substratos sólidos, por causa da menor capacidade tampão da solução nutritiva e da lâ-de-rocha (Carijo *et al.*, 2000).

O pH da solução deve ser mantido na faixa de 5,5 a 6,5, pois valores acima de 7 podem causar a precipitação de alguns nutrientes, principalmente micronutrientes como ferro, manganês, zinco e cobre, reduzindo sua disponibilidade para as plantas. Além disso, pH abaixo de 4 pode causar toxicidade. O crescimento das plantas é comprometido em pH abaixo de 5,0 ou acima de 7,0. Quando a leitura estiver acima de 7,0, realiza-se a acidificação da solução com a adição de ácido nítrico ou sulfúrico, utilizando um conta-gotas ou pipeta, até alcançar a faixa ideal de 6,0 a 6,5 (Carijo *et al.*, 2000).

Se o pH estiver abaixo de 5,0, pode-se adicionar hidróxido de sódio, hidróxido de potássio ou carbonato de sódio, até que atinja o nível desejado. No entanto, a adição de ácidos ou bases fortes afeta diretamente o pH sem contribuir para o tamponamento da solução, podendo causar instabilidade ao longo do tempo se não houver um controle rigoroso. A estabilidade do pH em sistemas hidropônicos pode ser favorecida pela relação entre os íons nitrato (NO_3^-) e amônio (NH_4^+) na formulação da solução nutritiva. Quando essa relação for igual ou superior a 9:1, o pH tenderá a aumentar com o tempo; quando for 8:1 ou menor, o pH tenderá a diminuir (Jones junior, 1997).

Figura 6 - Disponibilidades de nutrientes em função do pH.



Fonte: Taiz e Zeiger (2017).

O diagrama (Figura 6) ilustra a relação do pH do solo, com os nutrientes das plantas, em que a largura da banda em qualquer valor de pH, indica a disponibilidade relativa do nutriente. A espessura da área indica o grau de disponibilidade do nutriente para as raízes das plantas, todos os nutrientes estão disponíveis na faixa de pH entre 5,5 a 6,5.

3.6.3 Temperatura

A temperatura da solução (TS) ou do substrato deve ser igual ou menor à do ambiente. De um modo geral, considera-se adequada a faixa de 20C° a 25C°. Temperaturas inferiores a 15C° e superiores a 30C° são indesejáveis, por causarem problemas nas raízes e facilitarem o desenvolvimento de fungos e bactérias.

Em dias quentes, o contato das raízes com soluções abaixo da temperatura ambiente resulta no murchamento temporário das plantas, na redução na absorção de nutrientes, na queda de flores e no atraso na maturação dos frutos. Solução nutritiva, ou substrato, com temperatura

mais alta do que a do ambiente também não é recomendável, pois pode causar a morte das raízes e o desenvolvimento de fungos e bactérias. Para evitar grandes variações de temperatura, o reservatório da solução estoque devem ser construídos com material isolante e ao abrigo da radiação solar (Carijo *et al.*, 2000).

3.7 PREPARO DA SOLUÇÃO NUTRITIVA

Todo sistema hidropônico utiliza uma solução denominada "solução nutritiva", na qual todos os nutrientes essenciais às plantas devem estar presentes em proporções adequadas para cada fase do desenvolvimento. Na literatura, são encontradas diversas indicações de fórmulas genéricas de solução nutritiva. A Tabela 1 expressa a concentração de três formulações diferentes.

Tabela 1- Indicações de formulações de solução nutritiva.

Elemento mg/L	Yunoki		Bernardes		Castellane & Araujo	
	<i>mín</i>	<i>máx</i>	<i>mín</i>	<i>máx</i>	<i>mín</i>	<i>máx</i>
Nitrogênio (NO ₃ ⁻)	70,00	210,0	100,0	300,0	100,0	300,0
Nitrogênio (NH ₄ ⁺)	0,0	40,0	-	-	-	-
Fósforo	15,0	50,0	35,0	70,0	35,0	70,0
Potássio	80,0	400,0	200,0	400,0	200,0	400,0
Cálcio	40,0	160,0	140,0	400,0	140,0	400,0
Magnésio	10,0	50,0	25,0	80,0	25,0	80,0
Enxofre	10,0	40,0	40,0	80,0	40,0	80,0
Ferro	1,0	5,0	2,0	10,0	2,0	10,0
Boro	0,1	1,0	0,5	1,0	0,5	1,0
Manganês	0,02	0,2	0,5	1,0	0,5	1,0
Cobre	0,01	0,1	0,02	0,10	0,02	0,10
Molibdênio	0,01	0,1	0,01	0,05	0,01	0,05
Zinco	0,02	0,2	0,05	0,10	0,05	0,10

Fonte: Adaptada de Castellane (1994); Bernard (1991); Yunoki (1998).

Diversas formulações genéricas de soluções nutritivas são descritas na literatura (Tabela, 1). A Tabela 1 apresenta composições específicas em mg/L para diferentes culturas. Essas concentrações são recomendadas para o início do processo, quando uma solução nova é preparada. No entanto, é importante considerar que ajustes podem ser necessários ao longo do

ciclo de desenvolvimento da planta, ou dependendo das características da água utilizada (Carijo *et al.*, 2000). A água deve ser potável e analisada para compensar elementos como cloro, cálcio e magnésio. O ferro pode ser quelatizado dissolvendo 50 g de sulfato ferroso e 60 g de EDTA dissódico, armazenando a solução em vidro escuro. No sistema aberto, é necessário misturar fontes de cálcio e ferro apenas na aplicação, para evitar precipitações e entupimentos.

As diluições devem seguir critérios como os descritos por Furlani, priorizando a solubilidade dos sais e o preparo correto de macronutrientes (Carijo *et al.*, 2000).

3.7.1 Reposição de Nutrientes

Furlani (1998) sugere um sistema de ajuste químico, através do monitoramento da CE, pela adição de sais com soluções estoque quando houver redução de $0,25 \text{ mS/cm}^{-1}$ na CE inicial. Silva filho (1997), e outros, propõem o uso da relação entre a concentração de nutrientes e a CE (com redução de 30% do valor inicial) para efetuar a reposição dos sais.

O controle de nutrientes na solução nutritiva, através de um sistema automático, foi proposto por Nielsen (1984), com base no ajuste do nível de água, da concentração de nutrientes e do pH. Em um nível constante de água, a queda na concentração de sais está correlacionada com a diminuição da condutividade elétrica (CE), a qual pode ser usada como monitor do nível de nutrientes na solução. Nesse método, os níveis de nutrientes são mantidos pela adição de soluções de manutenção. As proporções desses nutrientes devem corresponder ao influxo médio da cultura, ou seja, à taxa média de absorção de cada nutriente pela planta ao longo de seu crescimento. Esse valor é equivalente à proporção de nutrientes presente na massa seca da planta e pode ser determinado por meio de análise química do tecido vegetal (Backes *et al.*, 2002).

3.8 PLACA MICROCONTROLADORA ESP32®

A ESP32® é uma placa microcontrolada de uso geral, desenvolvida pela empresa chinesa Espressif Systems®, que é muito utilizada em aplicações desenvolvidas no âmbito da robótica e especialmente em projetos envolvendo (*IoT*). Devido a mesma apresentar conectividade Wi-fi e Bluetooth integradas, esta placa não apresenta a necessidade de módulos externos para utilização destas tecnologias de conectividade.

Com suas dimensões de pequeno porte, pode ser facilmente incorporado em placas de circuito impressos e outros circuitos eletrônicos. A programação do ESP32® pode ser em linguagem C/C++, e além da programação em seu ambiente próprio, o Software Development

Kit (SDK), esse microcontrolador também pode ser programado via interface Arduino IDE (Silva, 2021).

O ESP32 conta com um conversor ADC (Conversor Analógico para Digital) integrado, que utiliza a tecnologia SAR (Successive approximation Register) de 12 bits. Essa funcionalidade permite que o microcontrolador converta sinais analógicos, em valores digitais que são tratados internamente e processados pela CPU para tomada de decisão. O ADC do ESP32 suporta até 18 canais, permitindo a leitura de múltiplos sinais analógicos em diferentes pinos configurados para essa função (Espressif systems, 2020).

Com uma resolução de 12 bits, o ADC do ESP32 é capaz de representar o valor do sinal em 4096 níveis discretos, correspondentes 2^{12} . Logo a faixa de tensão de entrada, normalmente de 0 a 3,3 V é dividida em 4096 valores diferentes, de maneira a resolução do sinal é 0,8 mV/bit. Por fim, o valor digital resultante, que representa o nível de tensão analógica, é enviado para a CPU do microcontrolador para processamento ou armazenamento. Esse mecanismo torna o ESP32 altamente eficaz em aplicações que exigem a leitura de sinais analógicos, como sensores.

Os benefícios de usar ESP32® em grandes ou pequenos projetos, está na sua fácil configuração e programação. Este ambiente é pensado para o desenvolvimento de projetos que possam se vincular comandos e linhas de códigos para serem executados, por sensores e atuadores, dependendo da finalidade do executor.

3.9 INTERNET DAS COISAS (IOT)

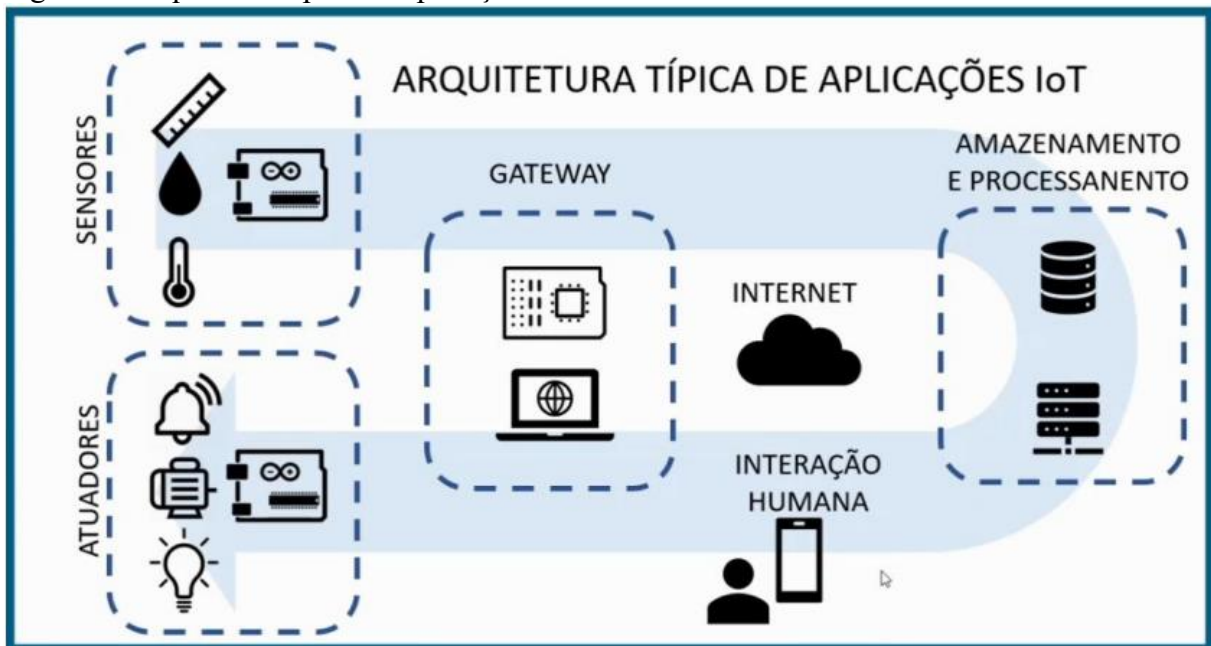
As plataformas de IoT são conhecidas por desenvolvimento de tecnologia utilizada para gerenciar e automatizar os dispositivos conectados em sua rede e um serviço que auxilia a conexão de objetos físicos a rede.

Na Agronomia, a Internet das coisas, traz a conexão de dispositivos a distância, possibilitando o controle e monitoramento de pragas, monitoramento agro meteorológico e sistemas capazes de promover a coleta, transmissão e tratamento dos dados, proporcionando uma agricultura de precisão (Silvia *et al.*, 2020).

A Internet das Coisas é uma extensão da Internet atual, que passa a interconectar objetos cotidianos, é uma rede de objetos físicos, que podem ser sensores de veículos, eletrodomésticos, ou qualquer objeto dotado de tecnologia embarcada, com sensores e conexões com a rede. Esta conexão com a rede, possibilita transmitir dados de seus sensores e controlar remotamente estes objetos. Com isso, estes objetos são transformados em provedores de serviços (Sruthy, 2024).

Arquiteturas IoT são formadas por módulos sensores e por módulos atuadores, que se conectam a um gateway e obtém acesso à Internet. Estes servidores costumam executar uma aplicação que se comunica com o usuário, como, por exemplo, um aplicativo ou um website, e que recebe comandos de atuação. Junto a estes comandos, o servidor pode processar rotinas de verificação e, se for necessário, atuar. Estes comandos de atuação partem dos servidores de armazenamento e processamento e fazem o caminho contrário, tendo seu destino nos atuadores. A Figura 7 exemplifica uma arquitetura geral (Fernandes, 2021).

Figura 7- Arquitetura típica de aplicações IoT.



Fonte: Disciplina de introdução à Internet das Coisas (UFF).

3.10 APLICAÇÕES DE AUTOMAÇÃO EM HIDROPONIA

3.10.1 Empresas de Horticultura e Engenharia

A CoolFarm é uma empresa portuguesa que atua nas áreas de horticultura e engenharia, fornecendo soluções tecnológicas inovadoras para o aumento da produtividade e rentabilidade. A empresa desenvolve projetos tanto em hidroponia quanto em sistemas de agricultura convencional, oferecendo inovação e sustentabilidade.

Entre os produtos disponibilizados, destaca-se o *coolfarm in/store* que é um sistema vertical fechado que opera em um ambiente climatizado e higienizado (Figura 8). Esse sistema é descrito como uma estufa inteligente, projetada para integração em supermercados, restaurantes ou armazéns. A tecnologia permite o cultivo vertical de hortaliças durante todo o

ano, com uma economia de até 90% de água, reforçando o compromisso da empresa com a sustentabilidade e a eficiência dos recursos (João, 2017).

Figura 8 - Sistema vertical da empresa CoolFarm



Fonte: CoolFarm (2022).

Esta tecnologia é o resultado de três anos de pesquisa, desenvolvida com o objetivo de solucionar lacunas existentes no setor agroalimentar. Ela promove uma maior democratização na produção de vegetais de alta qualidade. Além disso, a empresa destaca que o sistema reduz significativamente o risco de contaminação, já que os operadores não têm contato direto com a máquina e não é necessário realizar operações como semear ou colher. Essa inovação é facilitada pelo uso de embalagens pré-preparadas contendo sementes, otimizando todo o processo produtivo.

Os consumidores finais se beneficiam diretamente dessa abordagem, adquirindo vegetais com máxima frescura, uma vez que as plantas são comercializadas ainda vivas. Todo o ciclo de produção pode ser monitorado e gerenciado por meio de plataformas móveis, como computadores ou smartphones, com comodidade, praticidade e controle remoto. Um diferencial adicional do sistema é o painel de administração, que permite o acompanhamento em tempo real de dados operacionais e ambientais, conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 - Plataforma de controle



Fonte: CoolFarm (2024).

A Agrotec é uma empresa espanhola que baseia sua tecnologia no setor agroalimentar, oferecendo soluções inovadoras para a produtividade e operações de empresas e entidades nesse segmento. Seu foco está na consultoria agrônoma, gestão de projetos de (Investigação, Desenvolvimento e Inovação). O nido pro é um sistema hidropônico inteligente projetado para automatizar e melhorar o cultivo vertical de plantas. Utilizando tecnologias avançadas, ele permite o controle preciso de diversos parâmetros essenciais para o crescimento saudável das plantas (Agrotec, 2024).

Figura 10 - Reservatórios Inteligentes do Sistema NIDO PRO para Hidroponia Vertical.



Fonte: Agointec (2024).

- O nido pro monitora e ajusta automaticamente os níveis de pH e condutividade elétrica (CE) da solução nutritiva, realizando até 96 verificações diárias para garantir a estabilidade ideal.
- Equipado com sensores digitais, o sistema mede e controla a temperatura, umidade e o déficit de pressão de vapor (VPD) do ambiente de cultivo, garantindo condições climáticas ideais para as plantas
- Possui capacidade para gerenciar até quatro reservatórios, permitindo a quantidade precisa de fertilizantes líquidos e ajustadores de pH, conforme as necessidades específicas de cada cultivo
- Através de uma interface intuitiva, o aplicativo permite programar e monitorar o cultivo em tempo real, de qualquer lugar, oferecendo comodidade e conveniência ao produtor

O NIDO PRO representa uma solução inovadora para o cultivo hidropônico vertical, integrando automação e controle precisos para promover o crescimento saudável das plantas de forma eficiente e sustentável.

Os projetos de solução em hidroponia apresentam uma ampla variação em termos de complexidade e aplicação. Apresenta sistemas altamente sofisticados, projetados para maximizar a eficiência e a automação em todas as etapas do cultivo. Esses sistemas são

direcionados para operações em larga escala, com investimentos significativos. Também há experimentos caseiros, geralmente de baixo custo, que visam apenas atender necessidades básicas, sem foco em expansibilidade, modificação ou planejamento estruturado. Essa polarização revela uma lacuna no mercado para sistemas intermediários, que combinam acessibilidade financeira com funcionalidade.

Identificando essa necessidade, surge a oportunidade de desenvolver um sistema hidropônico acessível, mas tecnologicamente confiável, capaz de atender diferentes escalas de produção. A proposta é criar uma solução completa que ofereça oportunidades e permita o cultivo de diversas plantas simultaneamente, conciliando eficiência, baixo custo e possibilidade de adaptação tanto para pequenos produtores quanto para operações comerciais maiores.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um sistema NFT de baixo custo, com sensores para pH, condutividade elétrica, temperatura da solução e do ambiente, umidade relativa e nível da solução. O sistema realiza aquisição de dados via Google Sheets e monitoramento em nuvem (IoT), permitindo a correção automática dos parâmetros para manter condições ideais de cultivo sem intervenção constante.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Desenvolver um projeto de hardware utilizando componentes de baixo custo;
- b) Construir um sistema de hidropônica NFT, utilizando canos de PVC;
- c) Escrever o algoritmo e programa para o monitoramento e controle do sistema;
- d) Testar e calibrar sensores de pH e condutividade, temperatura da solução nutritiva, temperatura ambiente e umidade do ar;
- e) Avaliar a autonomia do sistema no cultivo de alface.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades foram realizadas no Laboratório de Química Analítica Instrumental (Q204) do Instituto de Química da Universidade Federal de Alfenas.

5.1 EQUIPAMENTOS E MATERIAIS

Foram utilizados no desenvolvimento do projeto os equipamentos listados abaixo:

- a. pHmetro mPA-210 - MS Tecnopon
- b. Condutivímetro LUCA-150
- c. Banho ultrassom Unique, USC- 1400;
- d. Balança analítica Kern 410
- e. Balança analítica Mettler Toledo (Modelo HD, SP, Br); com precisão de $\pm 0,1$ mg;
- f. Capela de fluxo Laminar

5.2 REAGENTES

Os reagentes utilizados foram:

- a. $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ - Nitrato de cálcio tetrahidratado (PA, padrão ACS, Vetec)
- b. MgSO_4 - Sulfato de magnésio (PA, padrão ACS, Vetec)
- c. KH_2PO_4 - Fosfato monopotássico (PA, padrão ACS, ACS Científica)
- d. KNO_3 - Nitrato de potássio (PA, padrão ACS, Isofar)
- e. $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - Sulfato de manganês monohidratado (PA, padrão ACS, Caal)
- f. CuSO_4 - Sulfato de cobre (PA, Vetec)
- g. $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - Sulfato de zinco heptahidratado (PA, Nuclear)
- h. $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ - Molibdato de sódio monohidratado (PA, padrão ACS, ACS Científica)
- i. H_3BO_3 - Ácido bórico (PA, padrão ACS, Vetec)
- j. $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ - (PA, padrão ACS, Vetec)
- k. EDTA (SAL DISSODICO) - (PA, padrão ACS, Vetec)
- l. H_3PO_4 - Ácido Fosfórico (98%, PA, ACS Científica)
- m. KCl - Cloreto de potássio (PA, padrão ACS, ACS Científica)
- n. KOH - Hidróxido de Potássio (PA, padrão ACS, Alphatec)

5.3 COMPONENTES

Os componentes eletrônicos e materiais utilizados no desenvolvimento do hardware estão listados abaixo.

5.3.1 Microcontroladores

O microcontrolador ESP32® modelo ESP32-D0WD-V3 foram escolhidos devido às suas especificidades, conectividade Wi-Fi e Bluetooth, características essenciais para um sistema IoT. Esses dispositivos permitem integrar sensores e atuadores de forma eficiente e suportam programação em C++ via IDE Arduino, o que simplifica o desenvolvimento.

Figura 11 - Microcontrolador (ESP 32).



Fonte: Autor (2025).

5.3.2 Sensores

Foram usados sensores específicos para monitoramento das variáveis críticas do sistema:

- a) DHT11 Aokin para medir temperatura e umidade do ar.
- b) DS18B20 Maxim Integrated para medir a temperatura da água.
- c) PH-4502C para medir pH.
- d) KS0429 keyestudio TDS Meter V1.0 para medir a condutividade elétrica.
- e) Sensor Nível de Água – Boia Vertical P45 para ajustar o nível de água no reservatório.

5.3.3 Atuadores

Os atuadores controlam bombas que impulsionam soluções para ajustar o pH e a CE, além de garantir a circulação contínua da solução nutritiva.

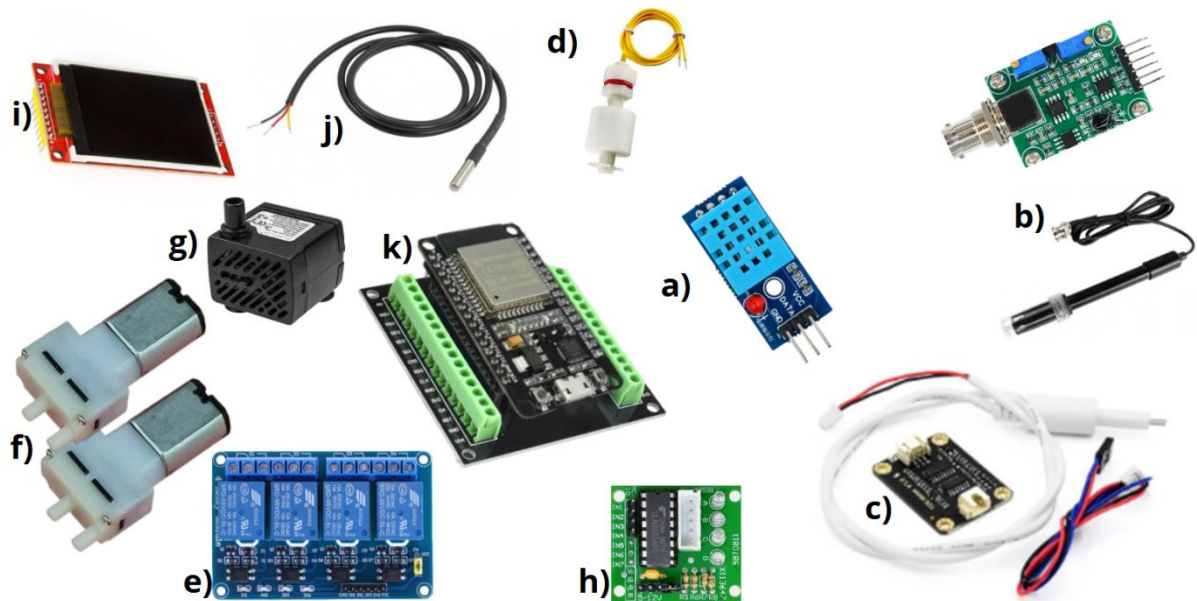
- 2- Módulo de relé 4 canais avr 51 pic 5v 12v, com optoacoplador, SunFounder.
- 1- Modulo Driver Uln2003 keyestudio.
- 2- Mini Bomba Vácuo Ar 3VDC 30KPA 0.28
- 4 -Mini bomba de aquário IPX8, Elo Imports.

Outros Materiais:

- Display TFT 2.8 Spi, CFsunbird.
- Fonte 5v chaveada C50-5.
- Protoboard para testes iniciais.
- Placa de expansão para ESP32 com 38 pinos Borner Parafusos, Keyes.
- Tubos de PVC luvas tampões e reservatórios.

A Figura 12 mostra todos os componentes que foram usados no projeto.

Figura 12 - Dispositivos e sensores utilizados na montagem do sistema de automação.



Fonte: Autor (2025).

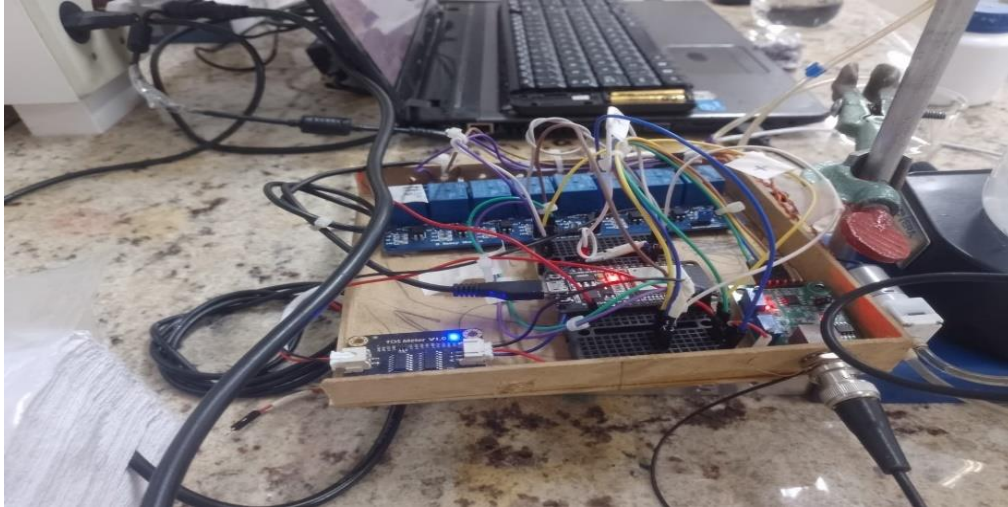
Legenda: (a) Sensor de temperatura e umidade do ar. (b) Sonda de pH com módulo. (c) Sensor TDS (Sólidos Dissolvidos Totais) (d) Bomba de nível de água. (e) Módulo de Relé 4 canais, 5V/12V, com optoacoplador. (f) Bombas a Vácuo (transporte de líquidos). (g) Mini bomba de aquário. (h) Módulo driver ULN2003 (i) Display TFT de 2,8 polegadas SPI. (j) Sensor de temperatura solução (k) Placa de expansão para ESP32 com o ESP32 com escudo de terminais.

5.4 ESTRUTURA DE HARDWARE DO PROTÓTIPO

A estrutura de hardware, do protótipo, é composta por um conjunto de componentes selecionados para garantir a funcionalidade e a confiabilidade do sistema. O núcleo do projeto é o microcontrolador ESP32, que integra um módulo Wi-Fi para comunicação sem fio, permitindo a transmissão de dados e o controle remoto.

Durante as etapas iniciais de desenvolvimento do protótipo, foi montada uma estrutura experimental para testar o funcionamento dos componentes e testar a integração entre o microcontrolador ESP32, os sensores e os módulos periféricos. Esta versão preliminar (Figura 12) foi construída sobre uma base de madeira, permitindo ajustes rápidos e modificações no hardware conforme necessário.

Figura 12 - Primeira versão do protótipo de automatização montado em protoboard



Fonte: Autor (2025)

Os sensores conectados ao microcontrolador incluem:

- a) **Sensor de pH:** Para monitorar o pH da solução nutritiva.
- b) **Sensor de Condutividade Elétrica (CE):** Para medir a concentração de nutrientes dissolvidos.
- c) **Sensor de Temperatura da Solução (TS):** Para garantir o controle térmico do sistema.
- d) **Sensor de Temperatura e Umidade do Ar (UR):** Para monitoramento ambiental.

Para o acionamento dos dispositivos, o sistema utiliza quatro módulos relé com fotoacopladores, em que três dos módulos acionam o VCC, GNG, e a leitura do sensor de condutividade elétrica (CE) e o terceiro modulo relé aciona o VCC do sensor de (pH).

A alimentação dos módulos relé foi feita com uma fonte chaveada de 5V, projetada para suportar simultaneamente a operação do microcontrolador, dos módulos relé e dos sensores, garantindo energia suficiente e estável para todos os componentes.

Além desses sensores, o sistema utiliza um segundo ESP32-D0WD-V3 com o modulo relé de 4 canais para acionar uma minibomba de água de aquário, que foi adicionada na versão final do sistema automatizado para a circulação da solução nutritiva, que opera com uma voltagem de 127 volts. No segundo Esp32 foi desenvolvido uma lógica baseada em temporizador para atuar no controle das luzes que foi configurado para operar em um ciclo de fotoperíodo de 6 horas desligado e 18 horas ligado, simulando as condições ideais de luz para o crescimento das plantas (Raven *et al.*, 1996). Esse controle automatizado reduz o consumo

de energia e otimiza o crescimento vegetal. O sensor de nível de água dentro do reservatório, foi implementado visando a evapotranspiração gerada pelas plantas nos processos de absorção de nutriente que leva uma diminuição dos íons em solução e conseqüente no nível de água.

5.5 CALIBRAÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS DOS SENSORES

A calibração e o tratamento dos dados dos sensores de pH e condutividade elétrica (CE) e temperatura da solução (TS), foram etapas fundamentais para assegurar a precisão e o desempenho do sistema automatizado. Essas etapas envolveram a aplicação de padrões analíticos, desenvolvimento de algoritmos específicos e testes detalhados para validar os sensores em condições reais de uso.

5.5.1 Sensor de pH

O sensor de pH foi calibrado utilizando soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, as quais permitiram verificar a linearidade do sensor dentro dessa faixa esperada. A calibração envolveu o uso de uma escala digital com resolução de 12 bits, característica do ESP32, que opera com valores de leitura de 0 a 3.3 volts. As leituras analógicas são convertidas em leituras digitais entre 0 e 4095, portanto a resolução é de 0,8 mV/bit, esses valores digitais fornecidos pelo sensor representa a escala padrão de pH (0 a 14).

5.5.2 Sensor de Condutividade Elétrica (CE)

A calibração do sensor de condutividade elétrica (CE) foi realizada inicialmente com base na suposição de uma relação linear entre os valores medidos em bits pelo ESP32 e os valores reais de condutividade elétrica. Conforme esperado e comumente adotado em sensores comerciais ao realizar os testes preliminares utilizando dois padrões de referência (147,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 1080 $\mu\text{S}/\text{cm}$), observou-se que os valores medidos pelo sensor não correspondiam adequadamente às concentrações padrão, indicando a inexistência de linearidade nos dados fornecidos.

Diante dessa inconsistência, foi desenvolvida uma nova abordagem para entender a relação entre os sinais medidos e os valores reais de CE. O processo envolveu a calibração do sensor utilizando 4 padrões de condutividade elétrica (KCl) concentração de $1,81 \times 10^{-2}$ a $9,35 \times 10^{-4}$ mg/L^{-1} cujas condutividades variaram de 1,0 a 3,1 mS/cm abrangendo toda a faixa operacional esperada para o sistema hidropônico, a correlação entre sinal e valor de condutividade foi calculada através de ajuste polinomial.

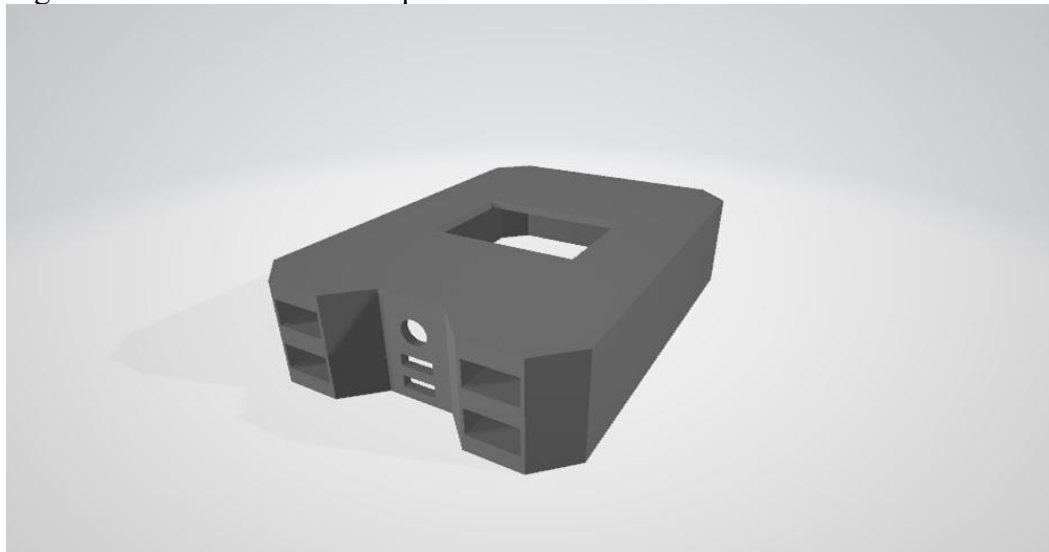
5.5.3 Sensor de Temperatura (DS18B20)

A calibração do DS18B20, foi realizado leituras de valores conhecidos de temperatura entre 10 C° e 80C°, foi realizado a compensação da diferença dentro do software. Foi utilizando a biblioteca OneWire, amplamente empregada para dispositivos que utilizam o protocolo 1-Wire. O uso da biblioteca simplificou a integração e a comunicação com o ESP32. Contudo, fez-se uma avaliação comparativa entre as temperaturas medidas com o sensor DS18B20 e o sensor referência utilizado foi o próprio condutivímetro comercial para avaliar as diferenças de temperatura.

5.6 MONTAGEM DO GABINETE E INTEGRAÇÃO DO CIRCUITO

O gabinete, para a fixação do circuito eletrônico, foi projetado utilizando o Autodesk Fusion® em um formato retangular otimizado nas dimensões de 20 cm por 14 cm para a disposição dos componentes internos.

Figura 13 - Gabinete moldado pelo software Autodesk Fusion®



Fonte : Autor (2025).

O gabinete foi impresso utilizando uma impressora 3D (Crealty-Ender 3V3) com o material PLA (Ácido Polilático), escolhido devido às suas características de ser um material biodegradável, ambientalmente amigável, proporciona precisão na impressão e resistência adequada para aplicações eletrônicas. A impressão foi realizada em camadas de alta resolução para garantir encaixes precisos e robustez estrutural, resultando em um gabinete funcional e robusto.

Figura 14 - Gabinete impresso para aquisição dos componentes do sistema automatizado

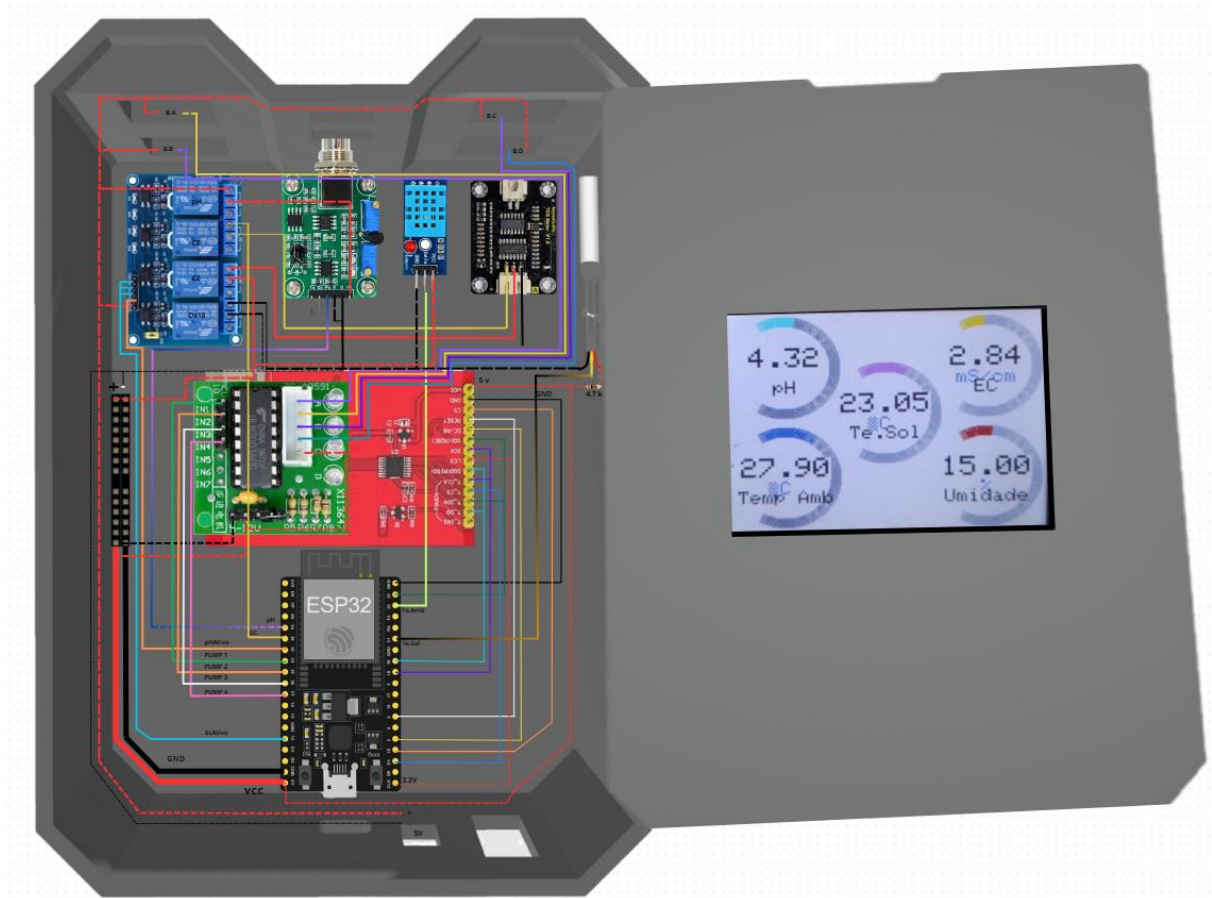


Fonte: Autor (2025).

5.6.1 Diagrama De Conexão dos fios e Hardware

Um dos aspectos importantes do projeto foi o uso de uma fonte chaveada de 5 volts, que fornece energia estável e confiável para o acionamento dos módulos de relé. Essa fonte chaveada é essencial para suportar as demandas de energia dos dispositivos, evitando oscilações que poderiam comprometer a estabilidade do sistema.

Figura 16 - Representação esquemática da integração dos componentes no gabinete



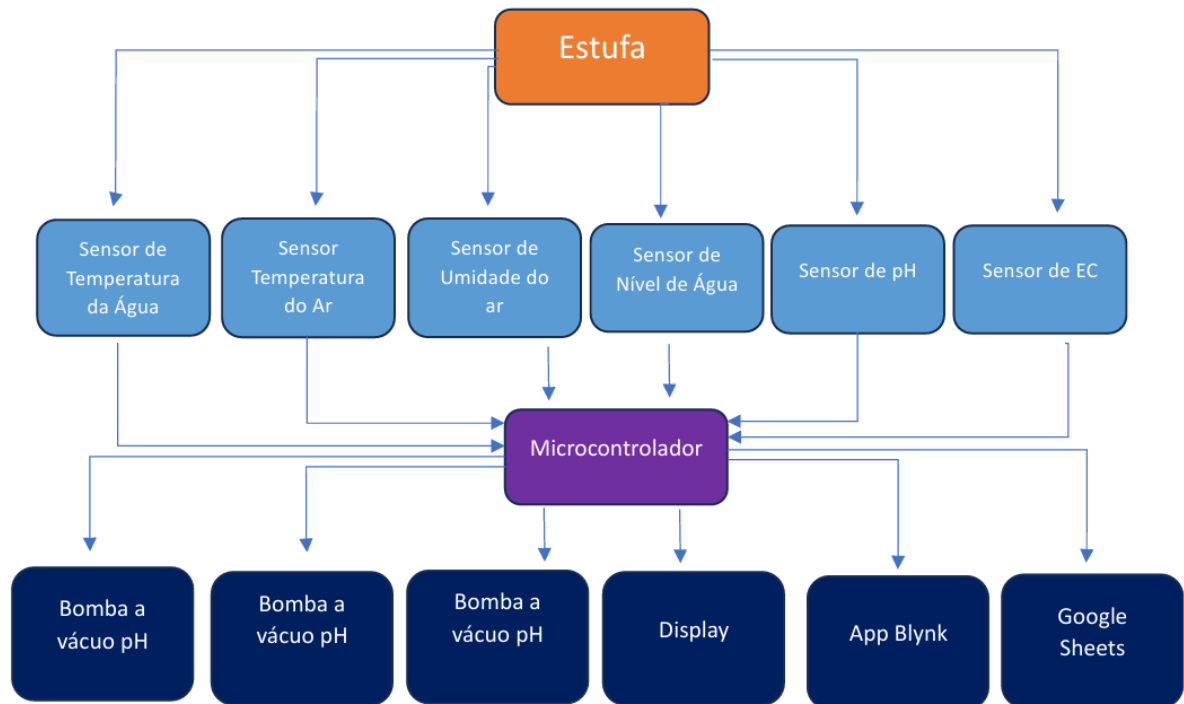
Fonte: Autor (2025).

5.7 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO NA IDE DO ARDUINO

A IDE do Arduino foi escolhida para o desenvolvimento do sistema por ser amplamente utilizada, de fácil acesso, e oferecer uma interface de programação com microcontroladores como o ESP32.

A Figura 18, mostra um diagrama de blocos do sistema proposto do microcontrolador geral. Ela ilustra a interligação dos componentes. Pela imagem é possível observar que se tem, como ponto de partida, a Estufa onde o sistema foi alocado. Logo em seguida, os sensores que coletaram os dados da estufa e do sistema hidropônico, estão conectados ao microcontrolador e que por fim se interligam com os dispositivos de saída e atuadores, como a tela, o aplicativo Blynk, Google Sheets e as bombas.

Figura 17 - Diagrama de blocos do sistema hidropônico proposto



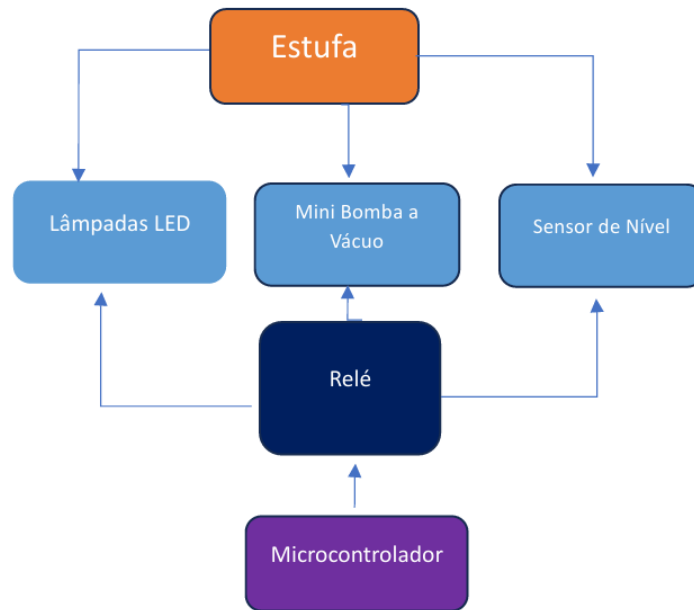
Fonte: Autor (2025).

A lógica de programação foi projetada para garantir o funcionamento eficiente e automatizado do sistema hidropônico. O código foi estruturado em etapas, com funções específicas para gerenciar os sensores, os atuadores e a comunicação com plataformas de monitoramento remoto, como o *Blynk IoT* e o *Google Sheets*.

No início do programa, as configurações iniciais são realizadas, incluindo a definição dos pinos de entrada e saída para os sensores e bombas, a inicialização da conexão Wi-Fi com as credenciais necessárias, e a configuração dos tokens de integração com as plataformas externas. Esse processo garante que o sistema esteja pronto para monitorar e enviar dados de forma contínua.

O programa segue com um ciclo contínuo, no qual o sistema realiza as leituras dos sensores de pH, condutividade elétrica (CE), temperatura da solução e temperatura e umidade relativa do ar. Para evitar interferências nas frequências, o acionamento dos sensores de pH e CE é feito de forma alternada, utilizando relés que ativam os sensores em momentos diferentes. Os dados coletados são então analisados e comparados com os limites estabelecidos: o pH deve permanecer na faixa de 5,5 a 6,5, enquanto a condutividade elétrica deve estar entre 1,2 e 2,1 mS/cm. Se algum parâmetro estiver fora do intervalo desejado, o sistema realizara verificações a cada 58 minutos que ativará automaticamente as bombas corretivas por um período de 10 segundos para ajustar os valores.

Figura 18 - Diagrama de blocos do segundo microcontrolador



Fonte: Autor (2025).

A Figura 18 apresenta um diagrama de blocos do sistema proposto, destacando o papel do segundo microcontrolador, responsável pelo acionamento dos relés que controlam as luzes da estufa e a circulação da solução nutritiva e o nível de solução nutritiva no reservatório. O funcionamento do sistema segue uma lógica programada onde a minibomba de irrigação é acionada em intervalos de 15 minutos, garantindo a circulação adequada da solução nutritiva. Paralelamente, o controle das luzes é mantido em um fotoperíodo de 18 horas ligadas e 6 horas desligadas, simulando condições ideais para o crescimento das plantas.

Além do controle local, os dados monitorados são enviados periodicamente para o *Blynk IoT* e o *Google Sheets*. O envio garante o registro histórico das ocorrências e permite o acompanhamento em tempo real por meio de dispositivos conectados à internet.

O sistema também verifica continuamente a conexão Wi-Fi e tenta reconectar automaticamente em caso de desconexão, garantindo a integridade das operações remotas. Essa estratégia estruturada na IDE do Arduino permitiu um desenvolvimento ágil, flexível, garantindo o funcionamento eficiente do sistema hidropônico e sua capacidade de adaptação a melhorias futuras a lógica completa está no apêndice (ANEXO X).

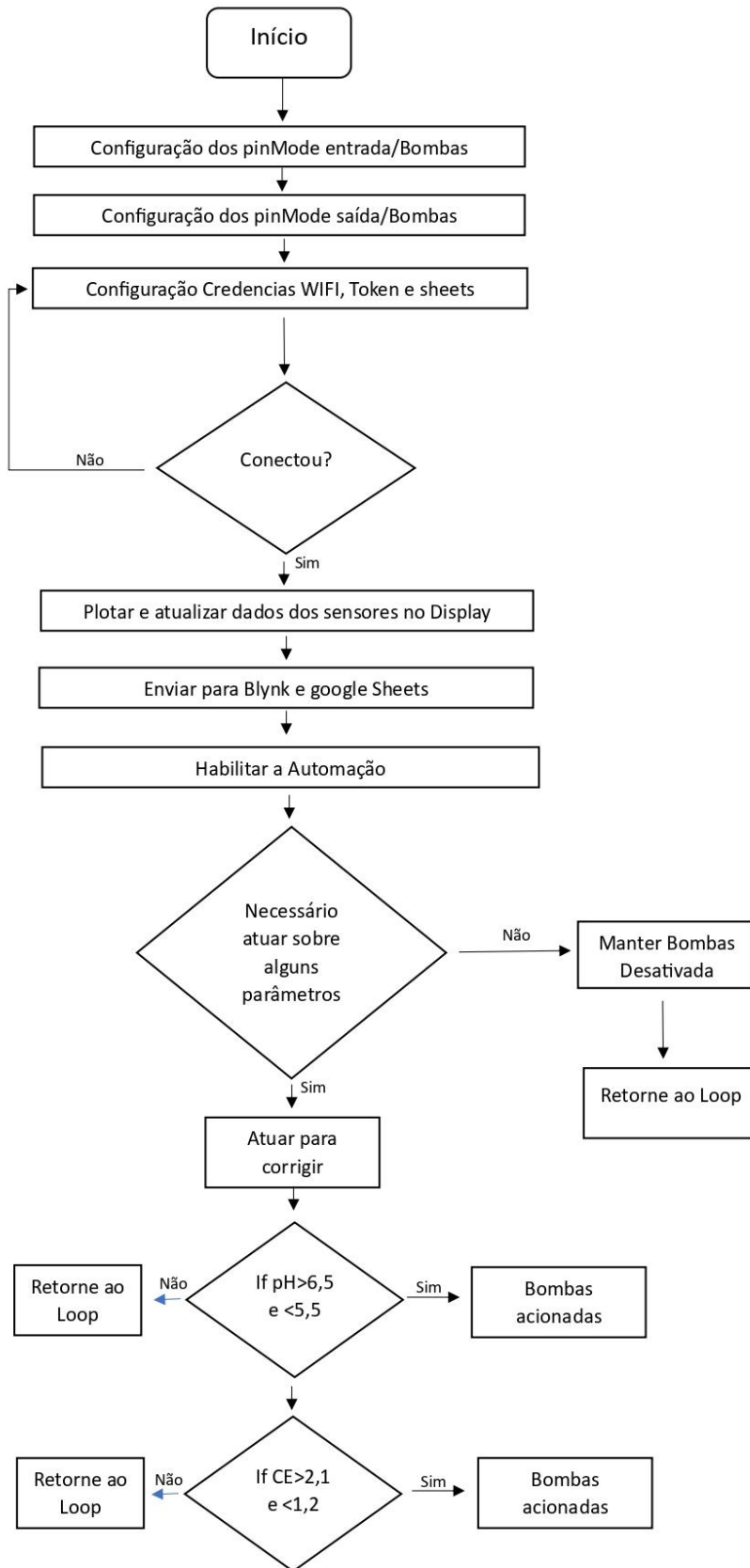
Tabela 2 - Atributos de Operação do Sistema

Atributos do Sistema	Disponibilidade
<i>Bomba de Irrigação</i>	Aciona a cada 15 minutos
<i>Luzes e led</i>	Acionam 18 horas e desligam durante 6 horas
<i>Nível de Água no reservatório</i>	Aciona a cada diminuição do volume total
<i>Bomba Ácida</i>	Aciona quando o pH > 6,5 por 10 segundos.
<i>Bomba Básica</i>	Aciona quando o pH < 5,5 por 10 segundos.
<i>Bomba de Nutrientes</i>	Aciona quando o CE < 1,2 por 10 segundos.
<i>Bomba de Água</i>	Aciona quando o CE > 2,2 por 10 segundos.

Fonte: Autor (2025).

Na Tabela 2 são destacados atributos e rotinas essenciais de funcionamento do sistema automatizado. O fluxograma abaixo traz uma rotina que reflete a lógica de programação apresentada na automatização do sistema.

Figura 19 - Fluxograma da Lógica de Controle do Sistema Hidropônico Automatizado



5.8 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NA NUVEM VIA BLYNK E GOGLE SHEETS

A implementação do sistema de monitoramento e armazenamento de dados foi realizada utilizando as plataformas Blynk IoT e Google Sheets, escolhidas por sua facilidade de uso, custo-benefício e integração com o microcontrolador ESP32. Estas ferramentas foram empregadas para assegurar tanto o monitoramento em tempo real quanto o registro histórico dos dados do sistema hidropônico automatizado.

5.8.1 Monitoramento via Blynk IoT

A plataforma Blynk IoT foi utilizada para o monitoramento remoto dos dados operacionais do sistema. O blynk (IoT) oferece uma interface amigável, que permite a criação de painéis personalizados para visualização dos dados sem necessidade de conhecimentos avançados em desenvolvimento de aplicativos. A biblioteca oficial do Blynk para microcontroladores facilita a integração com o ESP32, possibilitando a comunicação por meio de redes Wi-Fi. Embora existam alternativas comerciais, o Blynk oferece um plano gratuito com recursos suficientes para protótipos e pequenas aplicações. A plataforma permite o envio de alertas e notificações ao usuário, além de possibilitar o controle remoto dos atuadores, como bombas e válvulas.

A interface do painel foi projetada para exibir os parâmetros principais do sistema hidropônico, como pH, condutividade elétrica e temperatura da solução, temperatura e umidade relativa do ar. Gráficos em tempo real foram configurados para monitorar as variações desses dados, enquanto botões interativos permitiram o acionamento manual de atuadores quando necessário. A comunicação foi realizada por meio do protocolo Wi-Fi, utilizando a biblioteca oficial do Blynk para ESP32.

Figura 20 - Dashboard Criado para monitorar a e aplicar comandos pela plataforma blynk



Fonte: Autor (2025).

5.8.2 Armazenamento de Dados no Google Sheets

O registro histórico dos dados foi implementado por meio do Google Sheets, que permitiu o registro automático das leituras dos sensores em intervalos regulares. A escolha do Google Sheets como plataforma de armazenamento foi motivada por sua acessibilidade, facilidade de integração e custo zero, além da capacidade de organizar os dados em um formato compatível com análises posteriores.

Para permitir que o ESP32 enviase os dados diretamente para o Google Sheets, foi implementado um código específico na planilha google, utilizando o App Script. Esse código foi configurado para receber as requisições GET enviadas pelo ESP32 e registrar os dados recebidos em linhas sequenciais da planilha.

5.8.3 Criação do Código no Google Sheets:

Foi desenvolvido um script no google Apps Script que se criou uma API simples para receber os dados enviados pelo ESP32. O script foi configurado para processar os dados recebidos por meio de uma URL específica gerada pela planilha e armazená-los em colunas correspondentes (ex.: pH, CE, TS, UR data e hora).

A lógica funciona na seguinte maneira: o ESP32 envia os valores dos sensores para uma URL gerada pelo App Script, anexando os dados no formato de parâmetros. As configurações enviadas pelo ESP32 (como pH, CE, TS, UR e as pump1, pump2, pump3, pump4 que são capturadas, o App Script processa as configurações, identifica suas respectivas colunas na planilha e armazena os valores em uma nova linha, garantindo que cada entrada seja registrada com correções. Os dados e a hora são formatados e inseridos automaticamente nas colunas correspondentes.

Essa abordagem simplificada, permite o registro eficiente e contínuo dos dados no Google Sheets, garantindo um histórico organizado. Além disso, o sistema foi configurado para enviar os dados a cada 58 minutos, otimizando o intervalo de coleta sem sobrecarregar a comunicação entre o ESP32 e o Google Sheets.

Tabela 3 - Histórico organizado da chegada dos dados enviados pelo Esp32 no Google Shetts

Data	Horas	pH	EC	Te.Sol	Te.Amb	Pump1	Pump2	Pump3	Pump4
05/12/2024	13:25:25	0	1,26	24.60	25.80	-	On	-	-
05/12/2024	14:05:24	6,32	0	24.70	25.90	-	-	-	-

Fonte: Autor (2025).

5.9 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NFT

A construção do sistema de cultivo hidropônico NFT dentro da estufa de fluxo laminar, foi planejado para proporcionar um ambiente controlado das variáveis, um fluxo constante de solução nutritiva nas raízes das plantas e garantir o crescimento uniforme e saudável. A montagem envolveu a aquisição de materiais, corte, montagem dos tubos e conexões necessárias para o a estrutura final do sistema

Para o desenvolvimento da estrutura principal, foram adquiridos tubos de PVC de diferentes diâmetros, incluindo luvas, tampões e reservatório. Os tubos de $\frac{3}{4}$ polegadas, foram cortados em seções de 50 cm cada, facilitando a montagem modular da base e a interconexão com outras partes do sistema através de luvas. Já os tubos de 50 mm de diâmetro que foram empregados na circulação da solução nutritiva com cavidades para inserção das plantas,

cortadas utilizando ferramentas adequadas para assegurar precisão e uniformidade. Na estrutura de crescimento das plantas, os cortes foram realizados com um diâmetro de 35 mm, o reservatório utilizado com capacidade para 10 Litros afim de garantir o transporte contínuo do fluido entre o reservatório e as plantas.

O sistema completo foi então posicionado dentro da estufa, ajustado para proporcionar um fluxo uniforme e contínuo, essencial para o sucesso do cultivo hidropônico. As mangueiras conectadas às bombas possuem comprimento de 30 cm e diâmetro interno de 8 mm, garantindo eficiência na sucção no transporte das soluções corretivas. Já as mangueiras utilizadas para a ligação do reservatório possuem um diâmetro interno de 12 mm, adequadas para suportar o volume maior necessário à circulação da solução nutritiva no sistema.

Sistema automatizado.

Figura 21- Sistema NFT automatizado com sensores e controle via IoT para monitoramento e correção de pH e condutividade elétrica.



Fonte: Autor (2025).

5.10 PREPARADO DAS SOLUÇÕES NUTRITIVAS

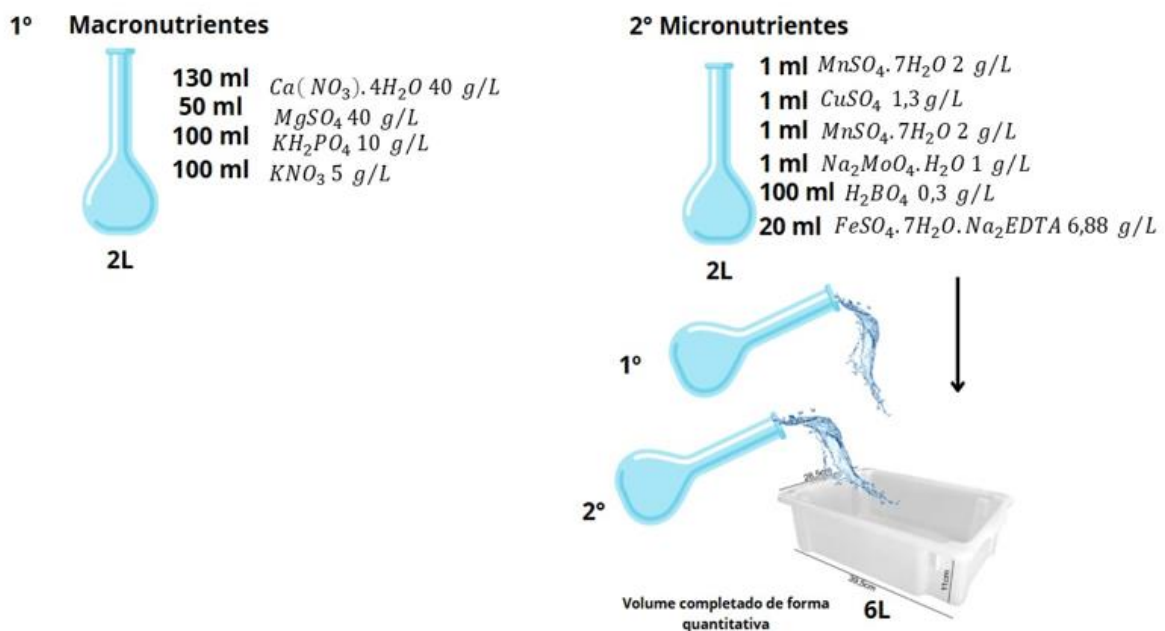
A solução nutritiva foi preparada com base nas necessidades específicas das culturas utilizadas (alface) e além das diretrizes descritas por Furlani (1998), para soluções hidropônicas. O preparo envolve, alcançar as faixas necessárias de macro e micronutrientes nas concentrações adequadas em mg/L. Para estabelecer as concentrações adequadas a solução nutritiva foi

preparada utilizando reagentes de grau analítico (P.A) disponíveis no laboratório de pesquisa, aos quais continham todos os nutrientes necessários em estoque.

A composição da solução nutritiva preparada apresentava inicialmente as seguintes concentrações de nutrientes em mg L^{-1} (mg/L^{-1}): N – 197,57; P – 37,96; K – 370,17; Ca – 112,92; Mg – 26,90; S – 36,72; Fe – 1,97; Mn – 0,10; Cu – 0,086; Zn – 0,013; B – 0,17; Mo – 0,066; com pH inicial de 5,77 e condutividade elétrica de $1,22 \text{ mS cm}^{-1}$.

A Figura 23, apresenta o procedimento de preparo da solução nutritiva, nota-se que as diluições, das soluções, foram feitas em duas etapas para evitar precipitação de sais.

Figura 22 - Preparo da solução nutritiva com macro e micronutrientes para o sistema NFT.



Fonte: Autor (2025).

5.11 PRÉ-TESTE DE AUTOMAÇÃO

Como parte da validação do sistema desenvolvido, foi realizado um pré-teste de automação com o objetivo de avaliar a eficiência das rotinas programadas e a capacidade do sistema em responder a variações controladas nos parâmetros de pH e condutividade elétrica.

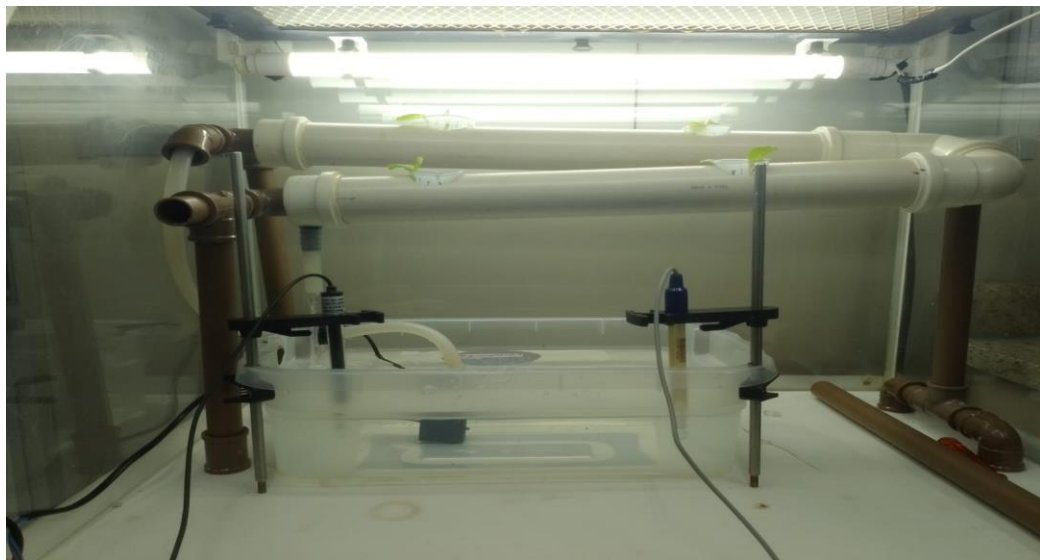
Os experimentos foram realizados considerando um volume de 6 litros de solução nutritiva, garantindo que as alterações aplicadas refletissem as condições reais de operação. Volumes de solução de HCl, NaOH foram adicionados a solução nutritiva afim de alterar o pH e a condutividade e verificar a eficiência do sistema na correção automática dos parâmetros por meio do acionamento das respectivas soluções de correção. Esses testes também auxiliaram na

definição das concentrações e volumes das soluções corretoras, bem como nos tempos de acionamento das bombas.

5.12 VALIDAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE REAL

O experimento foi conduzido em um ambiente controlado, mas sujeito às mesmas condições enfrentadas em um cultivo hidropônico convencional, incluindo fatores externos que podem influenciar os parâmetros avaliados. Para garantir a representatividade, o volume total da solução nutritiva foi mantido em 6 litros.

Figura 23 - Imagem das mudas de alface posicionadas para inicialização do ciclo de cultivo



Fonte: Autor (2025).

Foi implementado ao sistema quatro mudas de alface do tipo *Lactuca sativa var. crispa*, adquirida no comércio local. Antes da inserção no sistema automatizado, as mudas foram cuidadosamente lavadas com água destilada para remover o excesso de terra. Este procedimento teve como objetivo evitar entupimentos nos capilares ou danos às bombas.

Após o posicionamento das mudanças no sistema, o pH inicial foi de 5,80, e a condutividade elétrica (CE) registrada 0,96 mS/cm. O monitoramento automático foi iniciado no dia 15/05/2025, às 09h34, com o sistema configurado para enviar dados em intervalos regulares de 40 minutos.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

6.1.1 Sensor de pH

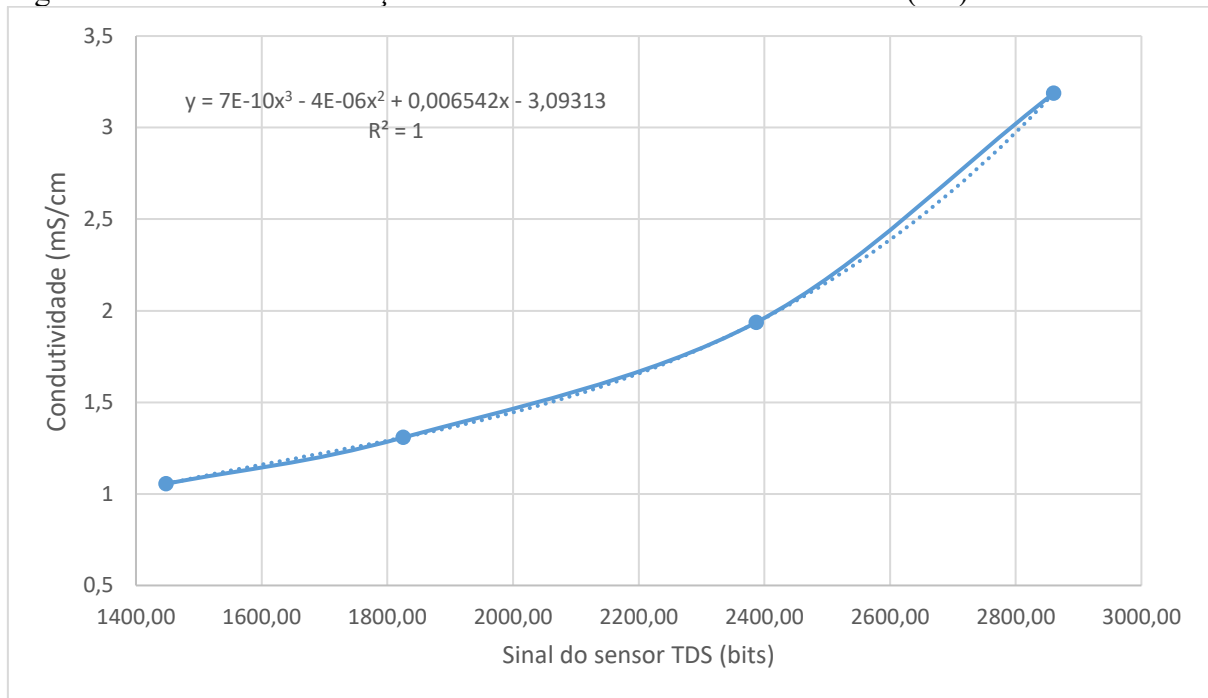
Na calibração do sensor de pH, utilizou-se duas soluções tampão pH 4,0 e pH 7,0. O sensor de pH foi inserido inicialmente em uma solução padrão de pH 7,0 onde foram obtidos valores em bits, dentro da escala de 0 a 4095 (12 bits), foram feitas dez leituras e o valor obtido foi de 2931,00(±0,69) bits. Em seguida, o sensor foi inserido em uma solução de pH 4,0, registrando o valor de 3890,90(±0,68) bits sinal digital.

A partir desses pontos, foi possível determinar a relação linear entre as leituras analógicas e os valores de pH, utilizando a fórmula geral de uma reta: $pH = m \times S + b$. Esses coeficientes foram determinados sendo, a intercepto (b) = 16.161 bits e inclinação (m) = -0.00312 bits/pH com $R^2 = 99,9$.

6.1.2 Calibração da Condutividade elétrica (CE)

A calibração do sensor de condutividade elétrica (CE) foi realizada utilizando 4 soluções de KCl, realizou-se as leituras, das dez soluções, em triplicata, simultaneamente com um condutivímetro comercial (LUCA-150) e com o sensor TDS a fim de se obter a correlação matemática entre os sinais (Figura 25). A equação obtida na correlação entre os valores esta apresentada no gráfico da Figura 25.

Figura 24 - Curva de Calibração do Sensor de Condutividade Elétrica (CE)



Fonte: Autor (2025).

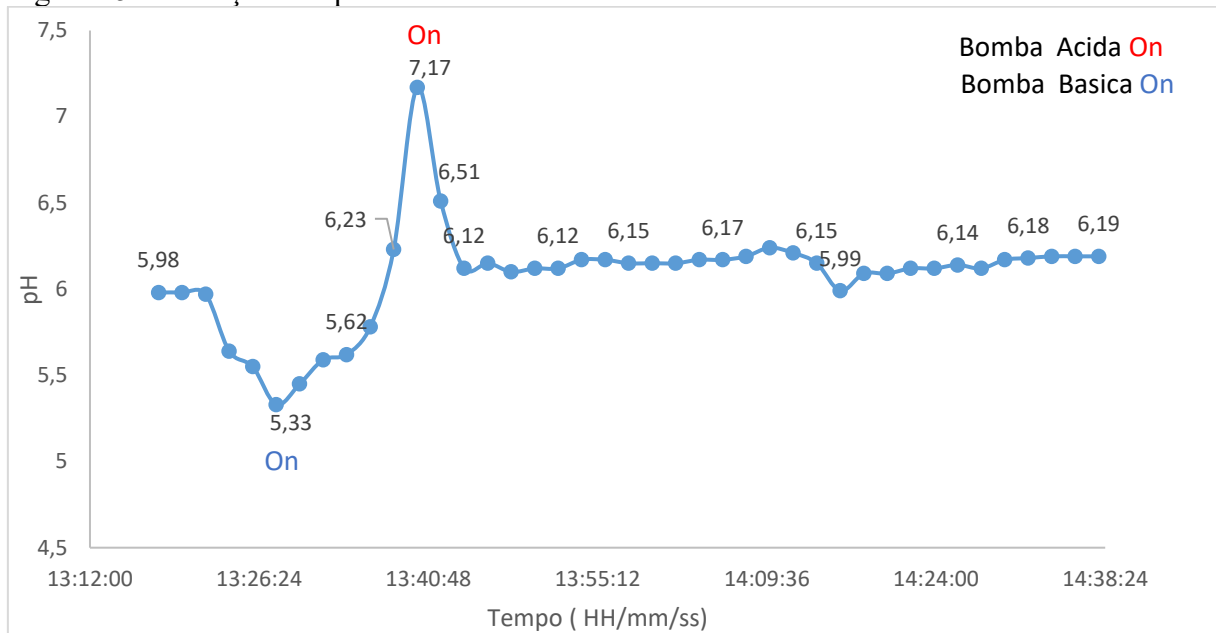
6.2 PRÉ-TESTE DE AUTOMAÇÃO

Como parte da validação do sistema desenvolvido, foi realizado um pré-teste para avaliar a autonomia do sistema de automação no controle de pH e CE. O objetivo principal foi verificar a resposta do sistema frente às perturbações controladas no pH e CE, avaliando a eficiência e o tempo de atuação das bombas de correção e o equilíbrio químico entre as espécies.

O teste teve início com a solução ajustada a um pH inicial de 5,80, valor previamente confirmado utilizando um equipamento comercial para garantir a exatidão da medição inicial. Após cinco minutos, foi realizada a perturbação no sistema utilizando-se solução de HCl (0,1 mol/L⁻¹). Essa abordagem foi utilizada para simular variações abruptas e observar a resposta automática do sistema.

Conforme mostrado, no gráfico de pH em função do tempo (Figura 26), a partir da adição da solução de NaOH (1,3x10⁻² mol/L⁻¹), foi possível observar variações no pH da solução, que foram corrigidas automaticamente pelo acionamento das bombas de correção.

Figura 25 - Variações do pH e Acionamento das Bombas Corretivas.

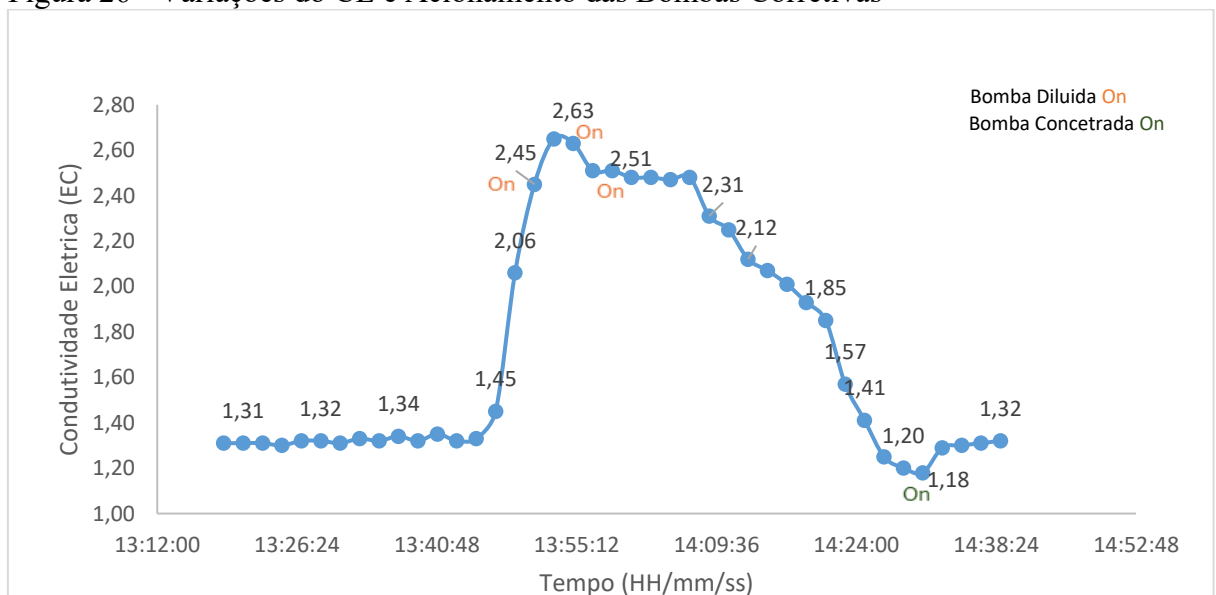


Fonte: Autor (2025).

No gráfico 26, observa-se que o pH inicial de 5,98 sofreu uma diminuição após a perturbação, atingindo valores em torno de 5,33 devido à adição de uma solução ácida. Nesse momento, o sistema acionou a bomba corretiva de solução básica, o que resultou em um aumento progressivo do pH. Após atingir 7,17, o sistema respondeu acionando a bomba corretiva de solução ácida HCl ($5 \times 10^{-3} \text{ mol/L}^{-1}$), estabilizando o pH próximo de 6,12.

Ao longo do tempo, as ações automáticas das bombas tiveram eficiência em corrigir as oscilações no pH, mantendo os valores dentro de uma faixa controlada. Esse comportamento evidencia a autonomia do sistema e a capacidade de resposta às mudanças simuladas.

Figura 26 - Variações do CE e Acionamento das Bombas Corretivas



Fonte: Autor (2025).

A Figura (27) ilustra o comportamento da condutividade elétrica (TDS) durante o pré-teste de automação, com o objetivo de validar a autonomia do sistema no controle de variações no parâmetro EC. Iniciou em 1,31 mS/cm, valor aferido por um medidor comercial de (CE), garantindo a confiabilidade do ponto inicial.

Após o período inicial de estabilização, foi introduzida uma perturbação no sistema, adicionando quantidades aleatória de solução de KCl ($0,1 \text{ mol/L}^{-1}$), simulando aumentos abruptos na condutividade elétrica. A primeira perturbação elevou o valor de TDS de 1,34 mS/cm para 2,63 mS/cm evidenciando a resposta esperada à adição da solução. Durante este período, o sistema acionou uma bomba diluidora (indicada no gráfico como "Bomba Diluída On"), que adicionou água para corrigir o excesso de condutividade.

À medida que a bomba atuava em intervalos de 3 minutos, o sistema conseguia diminuir a CE gradualmente, atingindo novamente a faixa de controle desejada. Após a estabilização inicial, foi observado que o processo de redução da condutividade elétrica demorou mais tempo em comparação ao aumento, pois a bomba diluidora precisou ser acionada 2 vezes para alcançar o valor desejado.

Por outro lado, a bomba de solução concentrada foi acionada apenas uma vez ao longo do teste, o que demonstra que a correção da condutividade elétrica foi eficiente e exigiu menos intervenções em comparação ao método anterior, como resultado, tem-se que os tempos de acionamento das bombas, bem como a concentração das soluções corretoras, podem, se necessário, serem ajustados, para otimizar a correção dos parâmetros nos níveis pré-determinados.

6.3 LÓGICA DE PROGRAMAÇÃO NA IDE DO ARDUINO

6.3.1 Requisitos de Operação e Desempenho

A lógica de programação desenvolvida no IDE do Arduino atendeu a todos os requisitos estipulados pelo sistema, cumprindo as funções previamente previstas. No entanto, foi necessário realizar ajustes para permitir a integração de todos os componentes de maneira funcional, o que exigiu a utilização de dois microcontroladores ESP32. Essa divisão foi essencial para gerenciar de forma eficiente os recursos do sistema e as funcionalidades.

No microcontrolador principal, a lógica de controle foi direcionada para a aquisição de dados dos sensores, enquanto o segundo ESP32 foi utilizado para controlar as bombas a iluminação e o sistema de iluminação e o nível de água no reservatório. Nesse ESP32 adicional

foi utilizados relés para o acionamento automático das bombas de irrigação, ajustados para serem ligados a cada 15 minutos, garantindo uma frequência ideal de supervisão e a manutenção ideal no nível de água no reservatório.

O ESP32 também foi empregado para gerenciar o sistema de iluminação, programando o desligamento das lâmpadas por um período de 6 horas (para simular o período noturno) e seu Desligamento por 18 horas (simulando o início do dia). A configuração dos períodos de luz e escuridão foi baseada em estudos sobre o fotoperíodo das plantas (Taiz e Steiger, 2017). A iluminação contínua pode levar ao estresse fotossintético, enquanto períodos prolongados de escuridão podem comprometer o crescimento.

No sistema atual, o período de 6 horas de escuridão foi estabelecido considerando o ciclo de fotoperíodo ideal para plantas de crescimento vegetativo, que normalmente demandam 12 a 18 horas de luz por dia (dependendo da espécie). Estudos mostram que o crescimento da alface em sistemas controlados é significativamente influenciado não apenas pela quantidade total de luz diária (DLI), mas também pela forma como essa luz é distribuída ao longo do dia, ou seja, pela combinação entre a densidade do fluxo de fótons fotossintéticos (PPFD) e o fotoperíodo. De acordo com Kelly *et al.* (2020), mesmo sob o mesmo DLI, plantas expostas a um fotoperíodo mais longo com menor intensidade luminosa apresentaram maior acúmulo de biomassa do que aquelas submetidas a períodos mais curtos com maior intensidade. Considerando esses estudos, o sistema foi programado para oferecer 18 horas de luz como uma lâmpada de LED de 20 W, por dia, seguidas por 6 horas de escuridão, promovendo assim um ambiente equilibrado que favorece o crescimento vegetal, otimiza o consumo energético e respeita os processos fisiológicos naturais das plantas. A programação respeita essas condições, como o desligamento das lâmpadas em horários estratégicos para permitir um ciclo biológico adequado e garantir o uso eficiente de energia.

6.4 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NA NUVEM VIA BLYNK E GOOGLE SHEETS

O sistema foi projetado inicialmente para que os dados coletados pelos sensores fossem enviados para o *Google Sheets* e aplicativo *Blynk* e monitorados em tempo real. Essa abordagem buscou garantir um armazenamento confiável dos dados na nuvem, além de facilitar o monitoramento remoto dos valores coletados.

Durante os experimentos realizados no laboratório, não teve complicações adicionais relacionadas à conectividade de internet que poderia impedir a implementação do sistema na nuvem. A sala utilizada para os testes era fechada e apresentava sinal de internet (*Wi-fi*) estáveis,

o que resultou nas taxas de envios na transmissão de dados serem armazenado no *Google Sheets*.

Essa abordagem permitiu a continuidade dos experimentos sem interrupções. Além disso, para prevenir problemas decorrentes de falhas na rede elétrica ou quedas de energia, foi utilizado um notebook como fonte alternativa ("*nobreak*"), garantindo que o sistema não fosse desligado de forma abrupta.

6.5 VALIDAÇÃO DO SISTEMA EM AMBIENTE REAL

Para avaliar a eficiência e a estabilidade do sistema automatizado em condições reais de cultivo, foram realizados dois ciclos experimentais com hortaliças em sistema hidropônico NFT. O primeiro ciclo teve duração de 30 dias, e o segundo ciclo, de 29 dias. Durante ambos os períodos, foram monitorados continuamente os parâmetros essenciais para o crescimento das plantas, como pH, condutividade elétrica (CE), temperatura da solução nutritiva, temperatura ambiente e umidade relativa do ar.

No primeiro ciclo experimental, observou-se a ocorrência de complicações operacionais que afetaram o desempenho do sistema. A primeira delas foi a distância inadequada da fonte de luz artificial em relação às plantas, o que resultou em crescimento desigual e possível estresse fotossintético. Além disso, foram notadas alterações significativas ao reabastecimento da água no reservatório, provocando variações bruscas nos níveis de pH e CE, exigindo maior esforço do sistema de correção automática. Outro fator limitante foram interferências nos sinais dos sensores, que gravavam leituras instáveis, especialmente nos sensores de pH e condutividade elétrica, comprometendo temporariamente o controle dos parâmetros e quedas frequente de energia que comprometeu a eficiência do sistema.

Com base nesses desafios, o segundo ciclo de 29 dias foi conduzido com ajustes específicos no arranjo experimental. A posição da luz foi readequada, mantendo uma distância fixa e ideal para o desenvolvimento das mudas. Também foram implementadas melhorias no processo de reabastecimento da solução nutritiva, tornando-o mais gradual para evitar choques no equilíbrio iônico. Para reduzir o ruído e as interferências nos sinais dos sensores, os componentes eletrônicos foram reorganizados sobre uma placa de fenolite, com conexões protegidas e melhor isolamento dos cabos de sinal e uma bateria auxiliar para prevenir quedas abruptas de energia. Essa reestruturação contribuiu para maior estabilidade das leituras e, conseqüentemente, melhor desempenho do sistema automatizado de correção dos parâmetros da solução.

Para garantir a precisão das medições, cuidados específicos foram adotados com os sensores. Os sensores de pH e CE foram removidos semanalmente para limpeza com água destilada, a fim de evitar o acúmulo de biofilmes e material particulado, o que poderia comprometer a acurácia das leituras. Além disso, nos sensores comerciais utilizados, foram realizadas calibrações semanais, com soluções padrão apropriadas, assegurando a confiabilidade dos dados ao longo do experimento.

Nos tópicos subsequentes, serão apresentados os gráficos e análises referentes ao desempenho do sistema durante esse período, com destaque para sua capacidade de manter as variáveis dentro das faixas ideais de operação, bem como a eficácia das correções automatizadas aplicadas. As concentrações das soluções ácida e básica utilizadas, foram mantidas conforme o pré-teste, mas podem ser ajustadas conforme o volume do reservatório e a resposta do sistema. Ressalta-se que, em sistemas hidropônicos, não existe um padrão rígido quanto à frequência e à quantidade de correções realizadas, sendo comum, inclusive, a realização de apenas uma medição por dia em operações manuais (Fathidarehnejeh *et al.*, 2023). Assim, o uso de correções automáticas e contínuas representa uma vantagem significativa, garantindo maior estabilidade dos parâmetros ao longo do tempo.

6.5.1 Primeira Semana

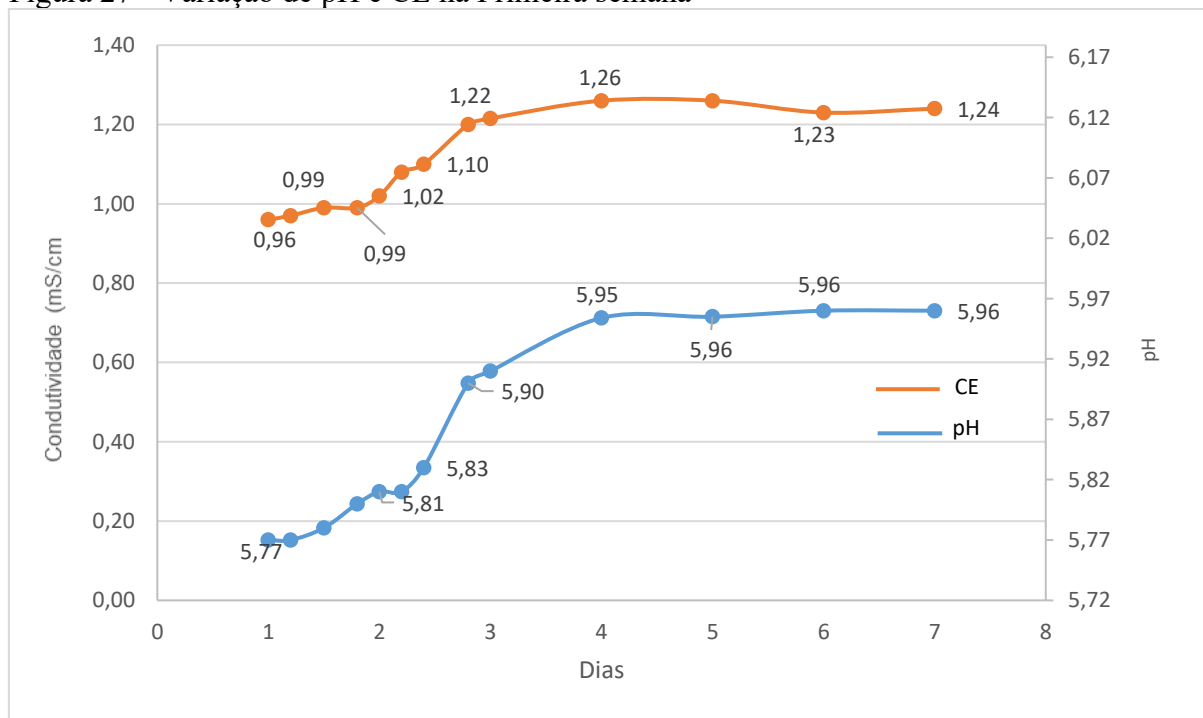
No início do experimento, as hortaliças foram transferidas para o sistema hidropônico automatizado com pH ajustado para 5,77 e CE em 1,22 mS/cm valores esperados em sistemas hidropônicos (FURLANI *et al.*, 1999). Devido ao pré-funcionamento do sistema por quatro dias antes da inserção das mudas, nesse período a evaporação natural reduziu o volume de água, acionando a reposição automática de água, o que diluiu a solução nutritiva e fez a CE diminuir de 1,22 mS/cm para 0,96 mS/cm. O sistema automatizado acionou a bomba de nutrientes concentrados (2,55 mS/cm) 6 vezes consecutivas a cada verificação do sistema, restabelecendo a concentração ideal. O processo demonstrou a capacidade do sistema em autorregular-se, mesmo frente a variações significativas.

Após os três primeiros dias de cultivo (Figura 28), observou-se uma ligeira tendência de aumento tanto no pH quanto na CE. O incremento no pH é um fenômeno esperado em soluções nutritivas onde o nitrato (NO_3^-) é a fonte predominante de nitrogênio. Conforme descrito por Carrijo e Makishima (2000) e Marschner (2012), a absorção preferencial do ânion nitrato pelas raízes leva à extrusão de íons hidroxila (OH^-) ou bicarbonato (HCO_3^-) para a rizosfera, como mecanismo de manutenção do equilíbrio eletroquímico, resultando na alcalinização da solução.

As flutuações observadas na CE durante esta fase inicial são inerentes aos sistemas hidropônicos dinâmicos, que pode ser atribuída a um balanço inicial onde a taxa de absorção de água pelas plantas pode ter superado ligeiramente a taxa de absorção de íons, ou a pequenas adições de nutrientes pelo sistema. De acordo com Taiz e Zeiger (2017), o equilíbrio entre a absorção de água e nutrientes na fase inicial depende principalmente da disponibilidade adequada dos nutrientes e das condições físico-químicas do meio, como o pH e a condutividade elétrica. Pequenas flutuações na CE são esperadas em sistemas hidropônicos, pois refletem o consumo gradual de nutrientes pelas plantas e a programação automática da solução nutritiva.

A Figura 28 apresenta a variação de pH e CE ao longo da primeira semana de cultivo. Durante este período, observou-se um declínio inicial nos valores de CE devido ao consumo de nutrientes pelas plantas da solução nutritiva, seguido por correções automáticas eficiente por parte do sistema, que restabeleceu os níveis adequados através de múltiplos acionamentos da bomba de nutrientes concentrados. O pH, apesar de apresentar algumas oscilações, manteve-se dentro da faixa aceitável sem necessidade de intervenções corretivas durante este período inicial.

Figura 27 - Variação de pH e CE na Primeira semana



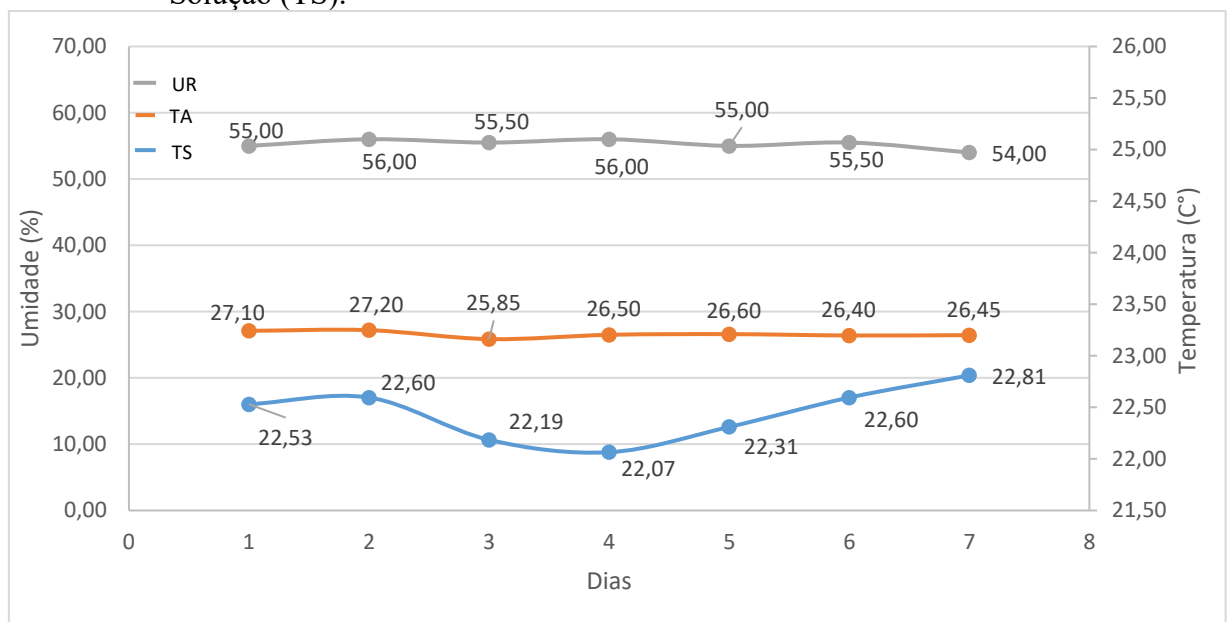
Fonte: Autor (2025).

Além dos parâmetros físico-químicos, a temperatura da solução nutritiva, apresentou pequenas variações entre 22,53°C e 22,81°C ao longo da semana (Figura 29). Essa faixa é considerada ideal para o cultivo hidropônico, pois favorece a absorção eficiente de nutrientes pelas raízes e mantém a atividade metabólica das plantas sem induzir o estresse térmico.

Temperaturas superiores a 28°C tendem a reduzir a solubilidade de oxigênio na solução, comprometendo o crescimento radicular e podendo resultar em sintomas de deficiência nutricional, como menor concentração de cálcio e magnésio (Taiz; Zeiger, 2017).

A temperatura ambiente (TA) ilustrada na Figura 29 manteve-se em mínimas de 26,45 °C com uso de ar-condicionado em ambiente controlado em 24,00 C°, atingindo picos de até 27,10 °C em dias mais úmidos. A umidade relativa (UR) variou entre 50% e 55%, valores que conseguem um equilíbrio favorável entre a taxa de transpiração das plantas e a absorção de água e nutrientes. Níveis controlados de temperatura e umidade são fundamentais para manter o potencial osmótico nas folhas, garantindo uma transpiração eficiente sem estresse hídrico (Resh, 2013; Taiz; Zeiger, 2017).

Figura 28 - Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS).



Fonte: Autor (2025).

A manutenção das condições climáticas e físico-químicas, tanto na solução quanto no ambiente externo, evidencia a importância do controle integrado no sistema automatizado. A temperatura da solução nutritiva, a temperatura ambiente e a umidade relativa atuam de forma interdependente, influenciando diretamente a capacidade de absorção de nutrientes e a eficiência dos processos metabólicos das hortaliças.

Figura 29 - Desenvolvimento das hortaliças durante a primeira semana de cultivo em solução nutritiva



Fonte: Autor (2025).

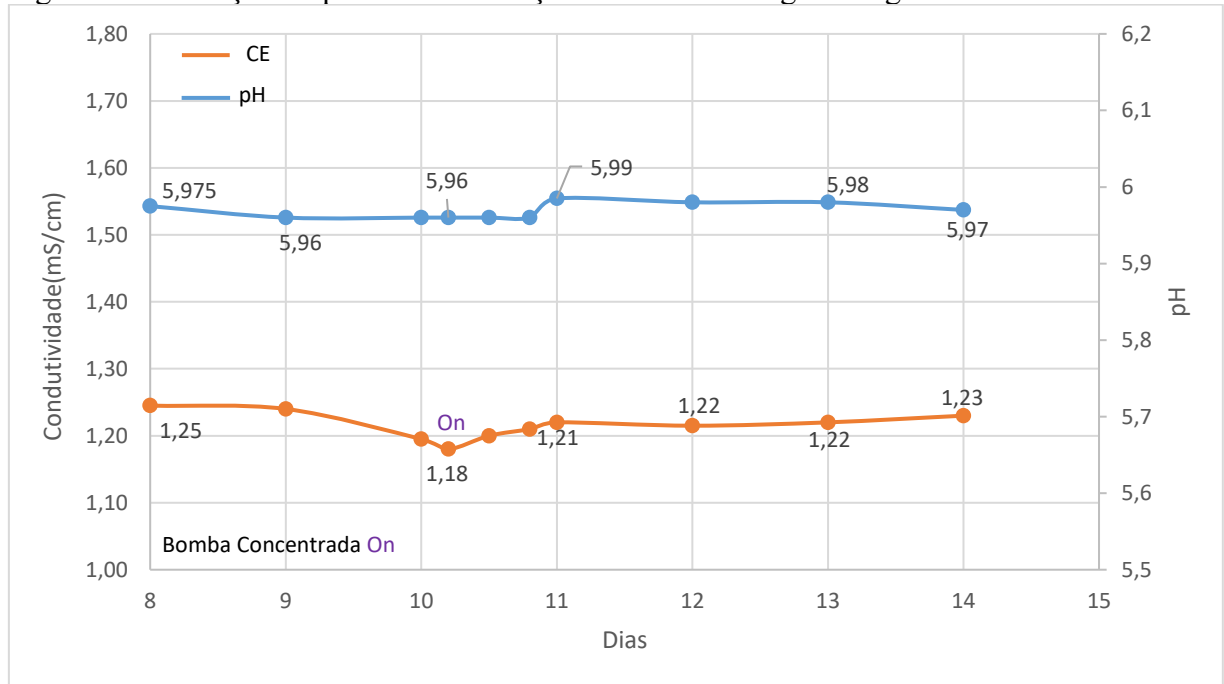
Como ilustrado na Figura 30, nos primeiros sete dias as mudas de alface apresentaram desenvolvimento vigoroso, refletindo a adequação das condições ambientais e nutricionais a que foram submetidas. Segundo Resh (2013), um dos fatores determinantes para o crescimento equilibrado em sistemas hidropônicos é a manutenção do nível de solução nutritiva, de forma a compensar continuamente as perdas por evaporação e transpiração. Nesse período inicial, o reabastecimento diário garantiu que o volume de água se mantivesse constante, enquanto a condutividade elétrica foi monitorada e ajustada sempre que necessário, permanecendo dentro da faixa ideal de 1,2–2,1 mS/cm sem apresentar aumentos excessivos. Esse controle evitou tanto a deficiência quanto o acúmulo excessivo de íons na zona radicular, assegurando uma semana de crescimento bem-sucedido e isento de estresses nutricionais.

6.5.2 Segunda Semana

A segunda semana de cultivo iniciou-se (dia 8) com o pH em aproximadamente 5,98 e a EC em 1,25 mS/cm, refletindo a continuidade das condições estabelecidas na semana anterior. Entre o 8º e o 10º dia, observou-se uma diminuição gradual na condutividade elétrica, que atingiu valores de 1,18 mS/cm. Esta redução na CE é primariamente atribuída ao aumento da taxa de absorção de nutrientes pelas plantas, que entram em uma fase de crescimento mais acelerado. Neste estágio, o consumo de íons da solução pode superar a taxa de consumo de água, levando à diminuição da concentração iônica total (Jones, 2005). Simultaneamente, a evapotranspiração continuou a reduzir o volume de água no reservatório. O pH, por sua vez,

manteve-se relativamente estável, oscilando entre 5,95 e 5,98, indicando que a absorção balanceada de cátions e ânions ou a capacidade tamponante residual da solução (embora limitada) foram suficientes para evitar grandes desvios neste período específico.

Figura 30 - Variação do pH e CE da solução nutritiva ao longo da segunda semana

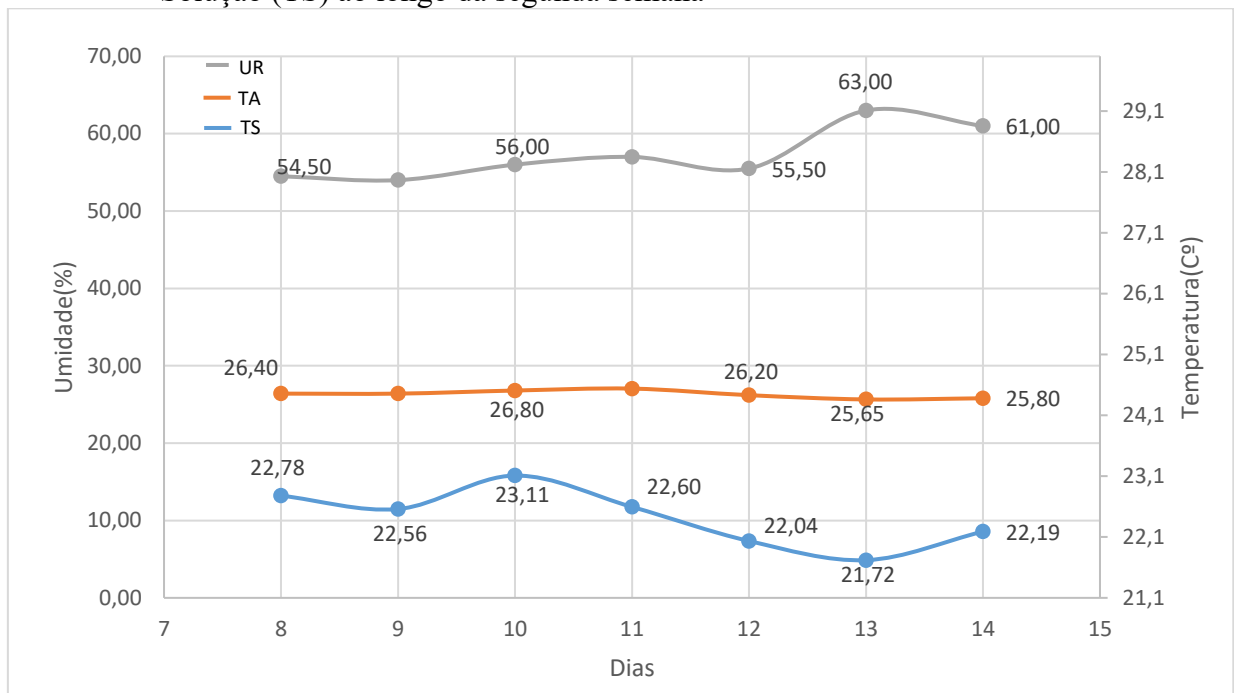


Fonte: Autor (2025).

As marcações "On" no gráfico (Figura 31), a partir do dia 10, indicam a ativação do sistema automático de reposição de nutrientes. É crucial destacar que o acionamento foi desencadeado pelo sensor de nível, que detectou a redução do volume de água no reservatório devido à evapotranspiração contínua das plantas em crescimento, que contribuiu para redução de cerca de 30% da sua capacidade. Visando maior eficiência em futuros ajustes, preparou-se uma solução nutritiva mais concentrada (5,65 mS/cm) e adicionou-se pequenas alíquotas no reservatório de reposição de nível de água até a condutividade aproximar de 1,22 mS/cm, reduzindo a incidência de diluições frequentes gerado pela bomba e garantindo maior estabilidade nos valores de CE. Portanto, o sistema operou de forma integrada ao detectar o nível baixo, iniciou a reposição, identificou a necessidade de nutrientes e comandou a adição da solução estoque concentrada.

Este processo coordenado permitiu compensar tanto a perda de água quanto o consumo de nutrientes, restabelecendo e mantendo a CE na faixa desejada (estabilizando em 1,21 mS/cm no dia 10). O sistema demonstrou precisão, com um tempo de estabilização de CE de aproximadamente 5 minutos após os ciclos de correção (cada ciclo de verificação de 58 minutos adicionava 10 ml de solução estoque em 10 segundos de ativação da bomba).

Figura 31 - Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS) ao longo da segunda semana



Fonte: Autor (2025).

Os valores de temperatura da solução nutritiva (TS), temperatura ambiente (TA) e umidade relativa do ar (UR) não apresentaram alterações significativas em relação à semana anterior. A temperatura da solução manteve-se estável ao longo da semana, apresentando no início da semana temperaturas de 22,78°C para 22,19°C no fim da semana, o que é adequado para o desenvolvimento radicular das hortaliças. Já a temperatura ambiente, mantida pelo sistema de ar condicionado, ficou em média de 26,32°C, com picos ocasionais de até 27°C em dias mais quentes. A umidade relativa do ar dentro da faixa ideal, oscilando entre 54% e 61%.

Figura 32 -Desenvolvimento das hortaliças durante a segunda semana.



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 33, observa-se que as quatro mudas de alface cultivadas, ao longo da segunda semana, apresentaram crescimento uniforme, evidenciando que as condições ambientais e os controles do sistema foram eficazes. Esse crescimento homogêneo indica que tanto a taxa fotossintética quanto a irrigação e os demais parâmetros monitorados — como pH e condutividade elétrica, estiveram adequadamente regulados durante esse período. A luz é um fator essencial para a fotossíntese, foi distribuída de forma equilibrada, permitindo que as plantas produzissem energia suficiente para seu desenvolvimento. Conforme Salisbury e Ross (1992), a intensidade luminosa influencia diretamente a taxa de fotossíntese líquida, que determina a energia disponível para o crescimento vegetal. Além disso, estudos como os de Taiz *et al.* (2017) ressaltam a importância do manejo adequado da irrigação e da nutrição para maximizar o potencial produtivo em sistemas hidropônicos. Dessa forma, o crescimento uniforme das mudas na segunda semana confirma o sucesso do monitoramento e controle do sistema, garantindo condições ideais para o desenvolvimento das plantas.

6.5.4 Terceira Semana

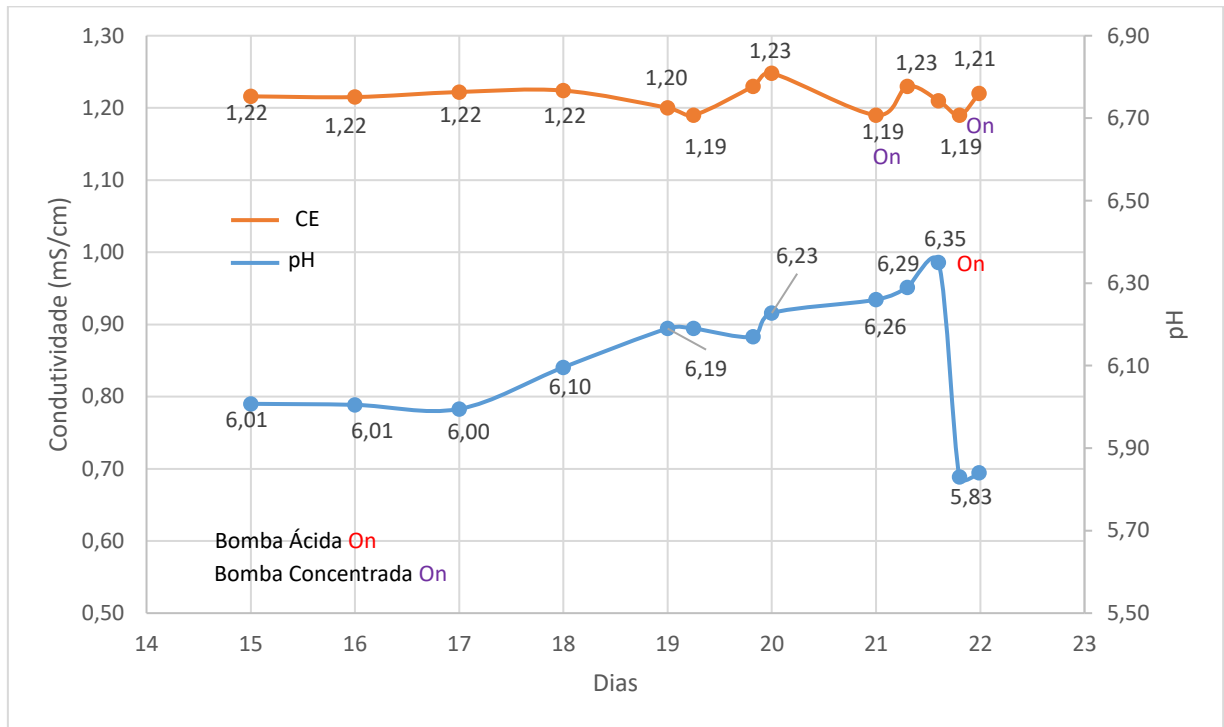
Logo no início da terceira semana (dias 15 a 18), observou-se comportamento significativamente mais dinâmico e instável dos parâmetros pH (linha azul) e condutividade elétrica (CE, linha laranja) em relação às semanas anteriores. Esta instabilidade representa não apenas uma simples flutuação de valores, mas reflete a complexa interação entre a atividade fisiológica das plantas e os múltiplos equilíbrios químicos estabelecidos na solução nutritiva. Entre os dias 15 e 17, os valores se mantiveram dentro de faixas consideradas adequadas para o desenvolvimento vegetal, com o pH oscilando entre 6,01 e 6,10 e a CE mantendo uma média de 1,22 mS/cm. Conforme destacado por Savvas *et al.* (2023), esta faixa de pH é ideal para maximizar a disponibilidade da maioria dos nutrientes essenciais, particularmente fósforo e micronutrientes, cuja solubilidade é altamente dependente do equilíbrio ácido-base do meio.

A partir do dia 18 observou-se uma elevação gradual do pH, que atingiu 6,35 no início do dia 22° e paralelamente, a condutividade elétrica (CE) também apresentou uma queda gradual, atingindo 1,19 mS/cm no dia 21, valor abaixo do limite inferior recomendado de 1,20 mS/cm para culturas folhosas em sistemas hidropônicos NFT (*Nutrient Film Technique*), (Resh, 2022).

Esta redução no CE indica uma diminuição na concentração total de íons dissolvidos, resultado direto da absorção de nutrientes pelas plantas em fase de crescimento ativo, o que levou ao acionamento da bomba concentrada de maneira a repor nutrientes e restabelecer o equilíbrio iônico da solução, em dois momentos distintos ao longo desse dia. Este processo de correção automática ilustra perfeitamente o princípio de Le Châtelier aplicado a sistemas hidropônicos, quando um sistema em equilíbrio sofre uma perturbação (neste caso, redução na concentração de íons), ele tende a se ajustar para contrabalançar essa perturbação (Atkins & De paula, 2021).

Na Figura 34 é possível observar a variação dos parâmetros de pH e condutividade elétrica CE ao longo da terceira semana de monitoramento. Esses dados refletem as dinâmicas químicas da solução nutritiva em resposta ao consumo de nutrientes pelas plantas e às correções automáticas realizadas pelo sistema de controle.

Figura 33 - Correção automática de CE e pH na terceira semana



Fonte: Autor (2025).

Na Figura 34, é possível observar os acionamentos automáticos das bombas do sistema, identificados pelos momentos de alteração nos valores de pH e condutividade elétrica EC, que representam os eventos de correção (“On”). Durante a terceira semana de monitoramento, o sistema contou com um reservatório auxiliar de controle, contendo solução nutritiva com concentrações previamente ajustadas (1,23 mS/cm), cuja função era compensar a concentração crescente de íons no reservatório principal.

Esse aumento ocorre em função do processo de evapotranspiração, que reduziu o volume de água no reservatório principal ao longo da terceira semana. Esse fenômeno, intrínseco ao metabolismo vegetal, causa o aumento da concentração de sais na solução (Taiz *et al.*, 2017; Sonneveld & Voogt, 2009). Perda de água por evapotranspiração, sem a correspondente redução na quantidade absoluta de íons, resulta em um aumento na força iônica da solução remanescente, afetando diretamente a atividade iônica e, conseqüentemente, os parâmetros de pH e EC.

O sistema, ao detectar a redução no nível do reservatório principal, acionava automaticamente a bomba do reservatório auxiliar, que adicionava água com nutrientes em concentrações ideais, promovendo a estabilidade do meio nutritivo e evitando desequilíbrios iônicos prejudiciais ao desenvolvimento das plantas. Esta estratégia de controle está alinhada com os princípios de manejo avançado de soluções nutritivas propostos por Savvas & Gruda

(2018) e aprimorados por Rouphael *et al.* (2024), que enfatizam a importância da manutenção da homeostase iônica para otimizar a absorção de nutrientes e o crescimento vegetal.

O comportamento do pH e da condutividade elétrica observado ao longo da terceira semana sugere a ocorrência de interações químicas e fisiológicas complexas no sistema hidropônico. A elevação progressiva do pH a partir do dia 18 pode indicar um acúmulo relativo de ânions básicos, como NO_3^- e SO_4^{2-} , em decorrência da absorção seletiva de nutrientes pelas raízes. Plantas em estágio de desenvolvimento ativo tendem a absorver preferencialmente cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e NH_4^+ ou ânions como NO_3^- e SO_4^{2-} , alterando o balanço iônico da solução (Sonneveld & Voogt, 2009). Quando há maior absorção de cátions em relação aos ânions, ocorre liberação de H^+ pelas raízes para manter o equilíbrio eletroquímico, resultando em acidificação da solução. Inversamente, a absorção preferencial de ânions pode induzir a liberação de OH^- , elevando o pH.

Neste caso, o aumento do pH até valores próximos de 6,35 indicou um excesso de espécies básicas, o que provocou o acionamento da bomba ácida pelo sistema automatizado. Antes disso, porém, ao atingir valores de EC de 1,19 mS/cm, abaixo da faixa ideal de 1,20 mS/cm, o sistema acionou a bomba concentrada, adicionando solução nutritiva para restaurar o equilíbrio iônico. Esse processo elevou a EC para 1,23 mS/cm, mas, como efeito colateral, promoveu a redução do pH, provavelmente devido à adição de íons de caráter ácido, como NH_4^+ e Ca^{2+} , que contribuem para o deslocamento do equilíbrio ácido-base da solução em direção à acidificação (Atkins & Jones, 2012).

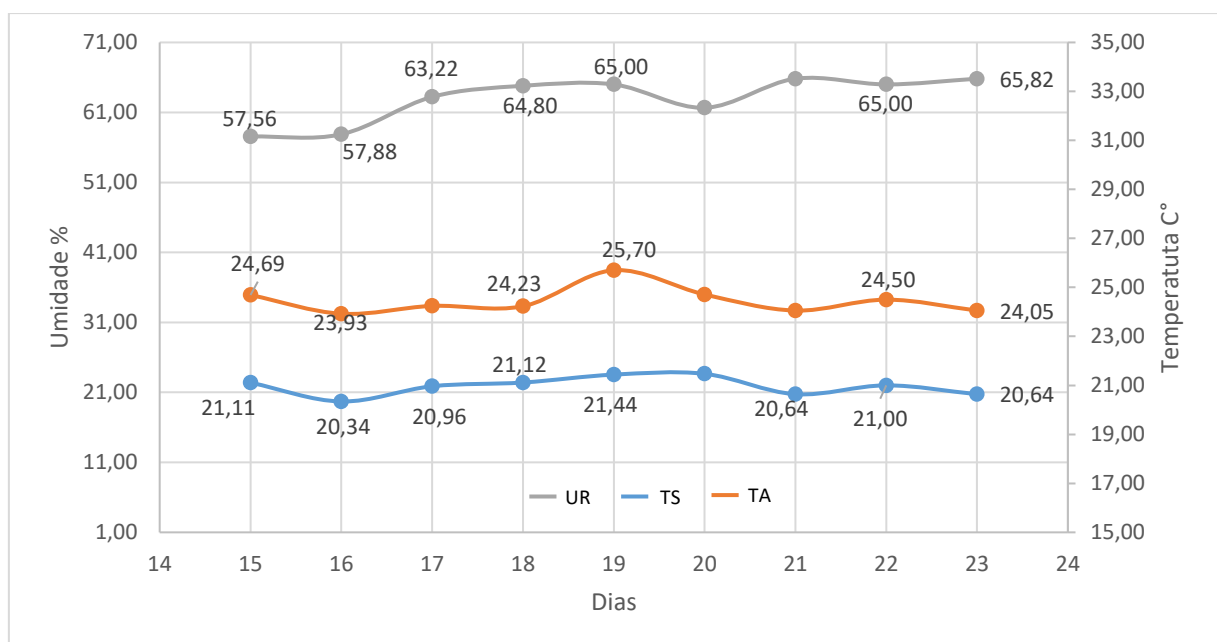
Esse comportamento está em conformidade com os princípios fundamentais da eletroquímica e da condutometria aplicados a soluções nutritivas. A condutividade elétrica é diretamente proporcional à soma das concentrações e mobilidades dos íons livres em solução. Íons como H^+ (com condutividade molar de 349,8 $\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$) e OH^- (198 $\text{S}\cdot\text{cm}^2/\text{mol}$) são altamente condutores devido à sua elevada mobilidade em solução, resultante do mecanismo de transporte por salto (mecanismo de Grotthuss) que envolve a reorganização de ligações de hidrogênio, em vez do movimento físico do íon através da solução (Hao *et al.*, 2021). No entanto, quando a bomba ácida adicionou H_3PO_4 (ácido fosfórico) no dia 22, com estabilização rápida, visando em reduzir o pH de 6,35 para 5,83, esse aumento de íons H^+ também deslocou outros equilíbrios: O ácido fosfórico, sendo um ácido triprótico, dissocia-se em três etapas sequenciais:



No entanto o pH da solução nutritiva (5,83-6,35), predominam as espécies H_2PO_4^- e HPO_4^{2-} , que apesar da presença de fosfatos, nas soluções nutritivas hidropônicas geralmente, apresentam baixa capacidade de tamponamento na faixa de pH operacional ideal para a maioria das culturas, que é entre 5,5 e 6,5. Estudos e a prática hidropônica confirmam essa baixa capacidade de tamponamento. Fonseca *et al.* (2005), em seu estudo sobre tamponamento em hidroponia de plantas ornamentais, afirmam que "Uma vez que as soluções nutritivas não são tamponadas, o pH deve ser ajustado diariamente para uma determinada faixa de valores".

A adição de ácido interferiu significativamente na condutividade, provocando um segundo acionamento da bomba concentrada ao detectar novamente a queda para 1,19 mS/cm. Este ciclo de correção automática está em conformidade com os princípios da potenciometria e condutometria aplicados a sistemas nutritivos balanceados, demonstrando a interdependência entre os parâmetros físico-químicos e a necessidade de um controle integrado para manter as condições ótimas para o crescimento vegetal (Rouphael *et al.*, 2024).

Figura 34 - Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS) ao longo da terceira semana



Fonte: Autor (2025).

A temperatura da solução nutritiva Figura 35, durante a terceira semana, apresentou uma variação entre 21,11°C e 20,64°C, umidade relativa do ar, que foi entre 57,67% e 65,82%, contribuindo para um ambiente favorável ao desenvolvimento das plantas e evitando o estresse hídrico, conforme destacado por Resh (2013).

Durante a terceira semana de cultivo, observou-se um crescimento nas hortaliças, já identificado na segunda semana, corroborando a hipótese de que condições otimizadas de nutrição e fotossíntese promovem um desenvolvimento vegetal acelerado (TAIZ et al., 2017). As plantas exibiram folhas significativamente maiores e mais robustas, um indicativo clássico de eficiência metabólica, uma vez que a expansão foliar está diretamente relacionada à disponibilidade de nutrientes e à taxa fotossintética (Epstein; Bloom, 2005).

Esse desempenho reforça a eficácia do sistema de cultivo adotado, uma vez que a absorção equilibrada de macro e micronutrientes – especialmente nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) – é essencial para o crescimento sustentado conforme (Marschner, 2012). Além disso, a relação entre a disponibilidade luminosa e a capacidade fotossintética demonstrou-se adequada, alinhando-se com estudos que destacam a importância da luz no alongamento celular e no acúmulo de biomassa (Larcher, 2006).

Figura 35 - Desenvolvimento das hortaliças durante a terceira semana



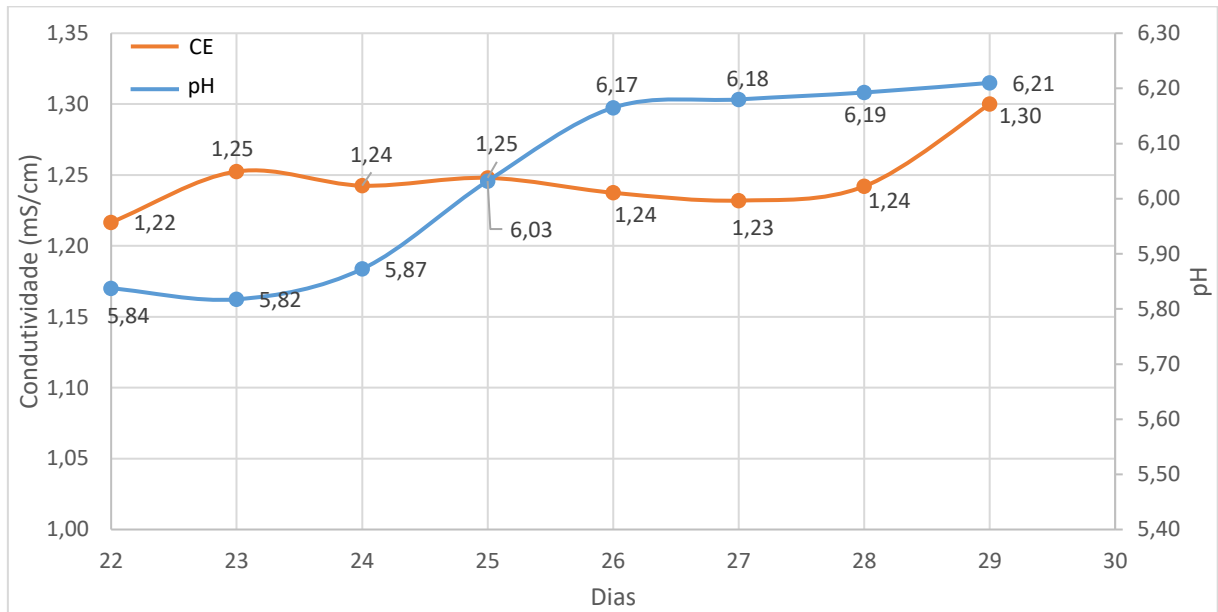
Fonte: Autor (2025).

Conforme mencionado anteriormente a proximidade à luz resultou em maior eficiência no processo fotossintético, favorecendo a absorção de nutrientes e o crescimento. Esses fatores evidenciam como até mesmo pequenas variações na distribuição de luz podem influenciar de maneira expressiva o desenvolvimento das hortaliças, especialmente em sistemas hidropônicos controlados.

6.5.5 Quarta Semana

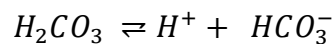
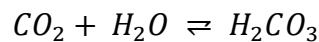
Na quarta semana de monitoramento, o pH da solução nutritiva apresentou oscilações relevantes, influenciado pelos ajustes automáticos realizados ao final da semana anterior e pelas contínuas trocas iônicas decorrentes da absorção diferencial de nutrientes pelas raízes. Esse comportamento reflete a natureza dinâmica do sistema hidropônico, no qual pequenas variações no balanço de cátions e ânions absorvidos podem deslocar significativamente o equilíbrio ácido-base. Por outro lado, a condutividade elétrica apresentou tendência de aumento ao longo da semana, ultrapassando $1,30 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ ao final do período. Esse crescimento foi provocado pela falha da bomba responsável pela reposição do nível da solução nutritiva, que queimou um dia antes do início do aumento observado. Como consequência, não houve diluição adequada da solução, intensificando o efeito da transpiração contínua das plantas e elevando a concentração de íons dissolvidos, o que explica o aumento da CE registrado no gráfico (Figura 37). Ainda assim, os valores permaneceram dentro de uma faixa considerada aceitável para o cultivo (Resh, 2013; Sonneveld & Voogt, 2009).

Figura 36- Variação da CE e pH ao longo da quarta semana



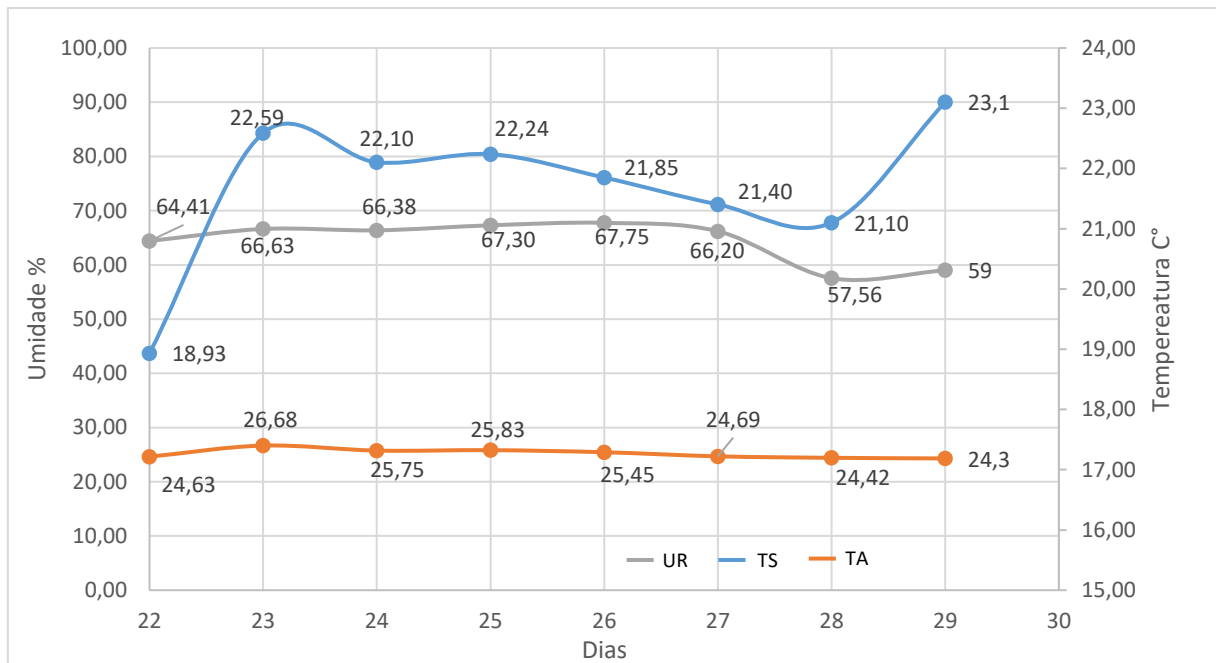
Fonte: Autor (2025).

Esse aumento no pH pode estar também vinculado a absorção preferencial de cátions, em que o equilíbrio químico desloca em favor da alcalinidade. O efeito pode ser intensificado pela perda de dióxido de carbono (CO_2) que reduz a concentração de íons H^+ e, conseqüentemente, eleva o pH. A equação abaixo representa a formação ácido carbônico e a liberação do íon H^+ em solução (MARSCHNER, 2012).



Com a redução da concentração de CO_2 , a quantidade de íons H^+ diminui, deslocando o equilíbrio em favor da alcalinidade da solução. Esse leve aumento foi citado também por Menezes Júnior (2004), que estudou o crescimento e avaliação nutricional da alface cultivada em “NFT” com soluções nutritivas de origem química e orgânica, em seus experimentos, verificando que o pH das soluções nutritivas sempre tenderam a elevar-se de um dia para outro, sendo necessárias maiores quantidades de ácido para a manutenção nas faixas 6,0 a 6,5.

Figura 37 - Temperatura Ambiente (TA) e Umidade Relativa do Ar (UR) e Temperatura da Solução (TS) ao longo da quarta semana



Fonte: Autor (2025).

Durante a quarta semana, observou-se que a temperatura da solução nutritiva (TS), representada pela linha azul na Figura 38, manteve-se estável, com variação discreta entre aproximadamente 24,65°C e 25,20°C. Essa faixa é adequada para assegurar a solubilidade dos nutrientes e a disponibilidade de oxigênio à zona radicular, favorecendo o metabolismo das plantas. A temperatura ambiente (TA), indicada pela linha laranja, oscilou entre 18,93°C e 23,10°C, mantendo-se constantemente inferior à TS, o que evidencia a eficácia do sistema de controle térmico automatizado, que garantiu a estabilidade da solução frente às variações externas. A umidade relativa do ar (UR), representada pela linha cinza, apresentou maior amplitude de variação, com valores mínimos de 57,56% e máximos de 67,50%. Esses picos e quedas podem estar associados às oscilações climáticas diárias e ao funcionamento do sistema de irrigação. Apesar dessas flutuações, as condições ambientais permaneceram dentro de limites aceitáveis para o cultivo, sem prejuízos ao desenvolvimento vegetal.

Figura 38 - Desenvolvimento das hortaliças durante a quarta semana.

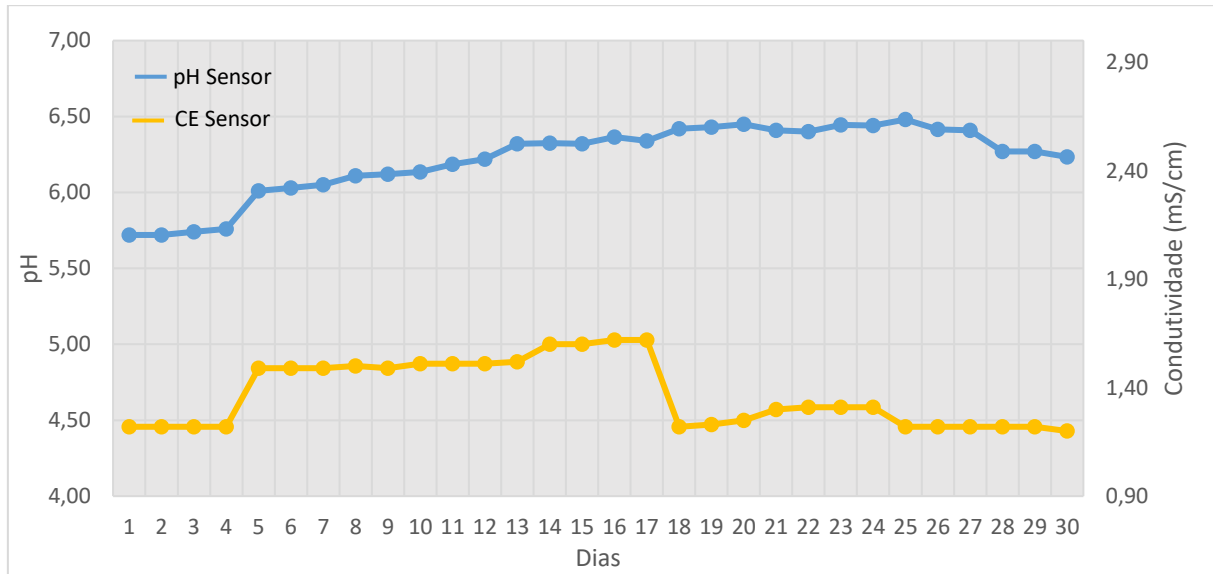


Fonte: Autor (2025).

6.5.6 Comparativo entre o primeiro e o segundo cultivo: Ajustes no manejo e impacto na fisiologia das plantas.

Durante o primeiro ciclo de cultivo, foi possível observar limitações importantes no desenvolvimento das mudas, atribuídas principalmente à ausência de um sistema automatizado de reposição do nível de água com pequenas diluições de solução nutritiva. Com o avanço dos dias, verificou-se uma elevação progressiva nos valores de pH e condutividade elétrica (CE), atingindo valores elevados, com pico de $1,60 \text{ mS} \cdot \text{cm}^{-1}$, simultaneamente, o pH chegou a 6,52, valor que reflete não apenas a concentração salina, mas também o desequilíbrio na absorção de íons pelas raízes conforme ilustrado na Figura 40.

Figura 39 - Valores de pH 4502C, TDS medidos com equipamentos comerciais durante o primeiro cultivo.



Fonte: (Autor, 2025).

Esse comportamento está relacionado diretamente ao processo de evapotranspiração das plantas. Sem a devida compensação da água perdida, a concentração de sais na solução aumentava gradualmente intensificando o estresse osmótico e prejudicando a absorção equilibrada de nutrientes pelas raízes. Além do aumento da condutividade, esse desequilíbrio favoreceu a elevação do pH, já que a absorção diferencial de cátions e ânions pelas raízes, e em especial o maior consumo de ânions como NO_3^- em relação a cátions como K^+ , que gerou um acúmulo de íons básicos na solução. Esse conjunto de fatores contribuiu para um crescimento vegetativo insatisfatório, evidenciado na Figura 41. As mudas representadas na figura a) estavam localizadas na parte inferior dos canos, onde houve menor incidência de luz solar, fator essencial para a fotossíntese e, conseqüentemente, para o desenvolvimento saudável das plantas. Além disso, essas plantas podem ter sido afetadas por um excesso de solução nutritiva, resultando em um ambiente com possível saturação hídrica e menor oxigenação das raízes, o que compromete ainda mais seu crescimento. Em contraste, as mudas da (Figura b) estavam posicionadas na parte superior dos canos, recebendo melhor luminosidade e provavelmente uma distribuição mais equilibrada de nutrientes, o que favoreceu seu desenvolvimento visivelmente mais vigoroso e saudável.

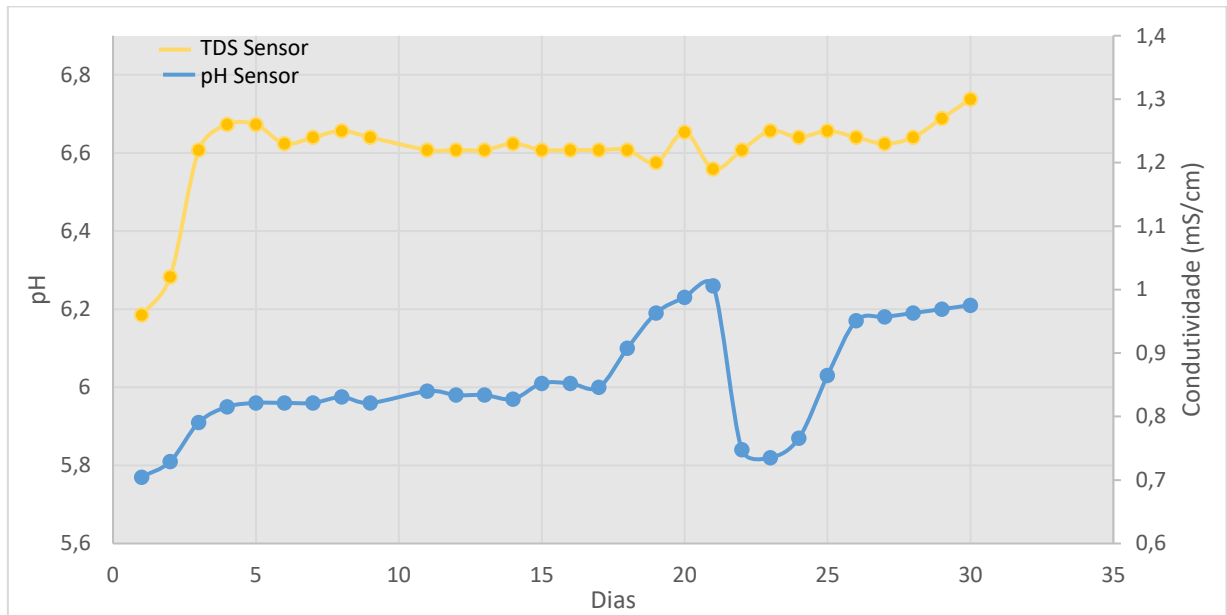
Figura 40 - Retirada das hortaliças do primeiro cultivo, após 30 dias.



Fonte: (Autor, 2025).

A partir dessas observações, foram implementadas modificações substanciais no segundo cultivo. A principal delas foi a introdução de um sistema automatizado de reposição hídrica, capaz de detectar a redução do nível da solução nutritiva e realizar a adição controlada de água contendo diluições previamente calibradas da solução de nutrientes e a retificação da faixa de acionamento de 5,5 a 6,3 e 1,2 a 1,9 mS/cm. Essa estratégia permitiu não apenas o controle mais preciso da concentração efetiva da solução que refletida em valores mais estáveis de CE, mas também favoreceu uma regulação mais eficiente do pH ao longo do tempo. Como consequência, houve melhora evidente na dinâmica de transpiração, uma vez que a reposição hídrica mantinha a pressão radicular adequada, evitando o fechamento estomático induzido por estresse hídrico.

Figura 41 - Valores de pH 4502C, TDS medidos durante o segundo cultivo.



Fonte: (Autor, 2025).

Ao comparar os dados do primeiro e do segundo cultivo, observa-se que, durante a primeira semana do primeiro ciclo, o pH da solução nutritiva apresentou elevações e flutuações típicas de sistemas hidropônicos, reflexo das trocas iônicas entre raízes e solução. No entanto, a partir da terceira semana, essas oscilações tornaram-se mais acentuadas, indicando um desbalanço progressivo no sistema. Paralelamente, a condutividade elétrica (CE) começou a se elevar de forma mais expressiva durante a segunda semana (Figura 42), evidenciando o acúmulo de sais pela evapotranspiração não compensada. Em contraste, no segundo cultivo, o perfil gráfico mostra que tanto o pH quanto a CE mantiveram-se mais estáveis durante as três primeiras semanas, com correções automatizadas sendo mais significativas apenas na quarta semana.

Figura 42 - Retirada das quatro mudas no segundo cultivo, após 29 dias.



Fonte: (Autor, 2025).

Além da automação, foi também ajustada a posição das fontes de luz artificial, promovendo uma distribuição mais uniforme da radiação fotossinteticamente ativa sobre todas as plantas do sistema conforme mostrado na (Figura 43). Essa alteração resultou em um crescimento mais homogêneo entre as mudas, corrigindo as assimetrias observadas no cultivo anterior.

Por fim, optou-se pela substituição dos reagentes utilizados no controle de pH: no primeiro experimento, utilizavam-se HCl e NaOH, enquanto no segundo cultivo foram adotados ácido fosfórico (H_3PO_4) e hidróxido de potássio (KOH). Essa escolha técnica se justifica pelo fato de que tanto o fósforo (P) quanto o potássio (K^+) são macronutrientes essenciais, ao contrário do cloreto (Cl^-) e do sódio (Na^+), que em concentrações elevadas podem ser fitotóxicos. A nova formulação contribuiu, portanto, para um manejo mais sustentável e nutricionalmente adequado da solução nutritiva. De forma geral, as modificações estruturais e operacionais adotadas no segundo cultivo, como a reposição automática da solução diluída e o novo posicionamento das fontes de luz, demonstraram resultados positivos já na segunda semana, quando as mudas apresentaram um desenvolvimento mais vigoroso e uniforme, validando a eficácia das melhorias implementadas.

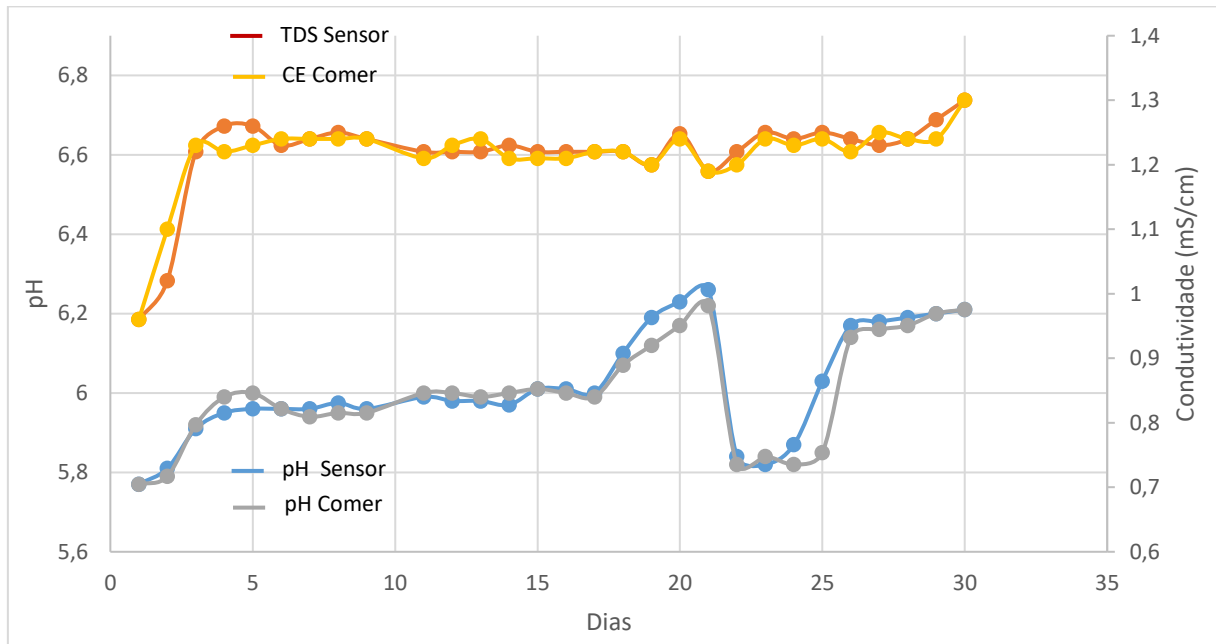
6.5.7 Avaliação dos sensores

Para avaliar a confiabilidade, sensibilidade e repetibilidade dos sensores utilizados, foi realizado um tratamento de dados para determinar a precisão e exatidão dos dispositivos. Esses métodos baseiam-se na aplicação de ferramentas matemáticas, como cálculo de erro absoluto, erro relativo e erro médio. Além disso, foi realizado um teste t-Student para dados pareados com um nível de confiança de 95%, a fim de correlacionar os valores gerados pelos sensores (pH 4502C, TDS e DS18B20) durante os 29 dias de monitoramento com os valores reais obtidos diariamente por meio de um condutivímetro comercial e outros sensores de referência. Essa abordagem permitiu identificar discrepâncias, avaliar estatisticamente o desempenho dos sensores e propor melhorias para sua aplicação em sistemas hidropônicos, garantindo maior confiabilidade na automação do controle de parâmetros essenciais para o crescimento das plantas.

Na Figura 44, os gráficos demonstram as leituras geradas pelos sensores comerciais e os sensores do sistema proposto durante os 29 dias de monitoramento, permitindo a análise de suas características de desempenho. As leituras do sensor de pH (4502C) obtiveram um valor médio de $6,02 \pm 0,13$, enquanto o valor médio obtido pelo sensor comercial foi de $6,00 \pm 0,13$ com exatidão de 99,74 % para o pH. Para a condutividade elétrica (CE), o sensor TDS utilizado apresentou um valor médio de $1,22 \pm 0,07$, enquanto para o condutivímetro comercial $1,22 \pm 0,06$ com exatidão de 99,88 % que operou dentro das faixas aceitáveis para o experimento.

As análises estatísticas, incluindo o teste t de Student para dados pareados e o teste de normalidade de Shapiro-Wilk (W) foram analisados pelo software Jamovi®, com um nível de confiança de 95%. Os resultados indicaram que para o pH (sensor pH 4502C), o valor de $p = 0,133$ e $W = 0,832$, demonstrando que não há diferença estatisticamente significativa entre os valores medidos pelo sensor e o peagâmetro comercial. Para a condutividade elétrica (CE), obteve-se $p = 0,489$ e $W = 0,841$, sugerindo que as medições do sensor TDS não diferem estatisticamente das medições do condutivímetro comercial, porém com uma menor normalidade dos dados.

Figura 43 - Valores de pH 4502C, TDS medidos com equipamentos comerciais

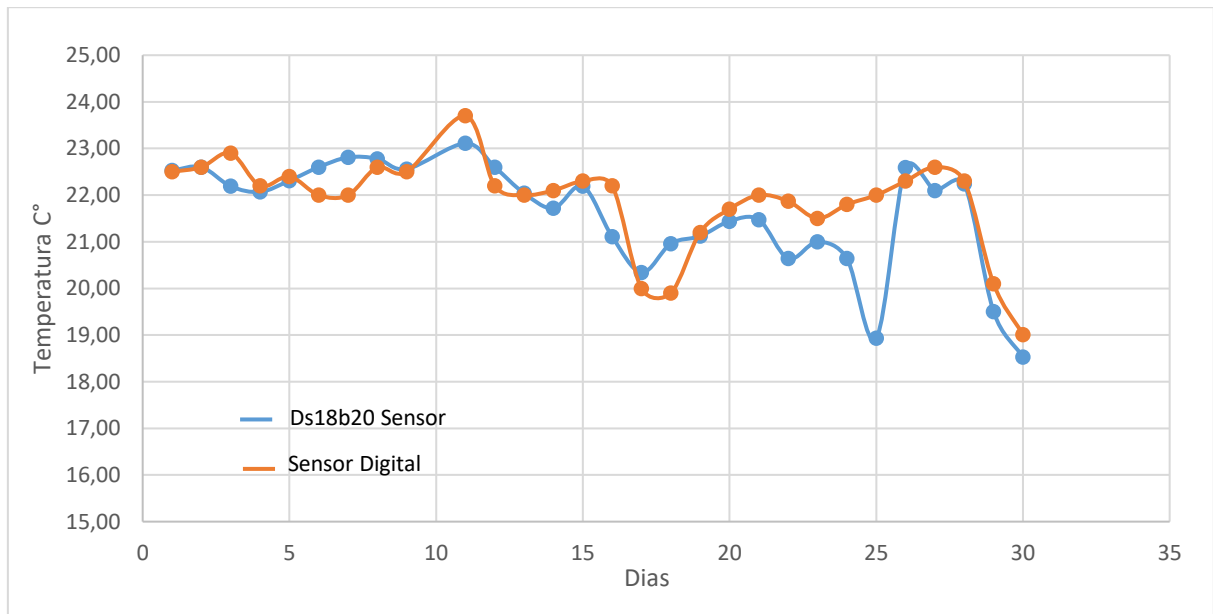


Fonte: Autor (2024).

Na figura 44, observa-se que os valores de pH permaneceram relativamente constantes ao longo do experimento, com uma elevação gradual entre os dias 15 e 21, variações controladas corrigidas pelo sistema. Por outro lado, os valores de CE exibiram menos variabilidade. Esses comportamentos destacam a eficiência do ajuste dos parâmetros no sistema hidropônico.

De maneira geral, os sensores utilizados apresentam boa precisão, representados pelos baixos desvios padrão. Verificou-se também que não há diferença estatisticamente significativa entre os valores medidos pelos sensores e os equipamentos comercial, indicando boa exatidão, o que reforçam sua confiabilidade para monitoramento em sistemas hidropônicos. Ambos os sistemas compartilham consistência nos dados ao longo do experimento, com variações semelhantes.

Figura 44 - Valores medidos dos sensores Ds18b20 e o sensor de temperatura digital em um mês.



Fonte: Autor (2025).

O sensor DS18B20, ao longo de 29 dias de monitoramento, apresentou leituras de temperatura da solução (TS) com média de $21,61 \pm 1,16$, enquanto o sensor comercial registrou uma média de $21,88 \pm 1,41$, com exatidão de 97,87% entre as medidas evidenciando uma boa correspondência entre os sistemas. O erro relativo foi de 0,97 %, indicando uma exatidão aceitável para aplicações práticas, mesmo considerando pequenas variações observadas durante o experimento, portanto o DS18B20 é uma opção confiável para aplicações de baixo custo. As leituras de temperatura ambiente (TA), apresentou média de $25,67 \pm 1,03$ enquanto o a umidade relativa do ar (UR) registrou médias de $60,26 \pm 4,85$ durante o experimento. O sensor DS18B20, responsável pela medição da temperatura da solução nutritiva, o teste revelou $p = 0,070$ e $W = 0,877$, reforçando a robustez das medições e a alta confiabilidade dos sensores.

7 CUSTOS FINAIS DO SISTEMA AUTOMATIZADO

Os custos relativos ao sistema de automação estão apresentados na Tabela 4. Cabe ressaltar que esse valor contempla exclusivamente os componentes elétricos e eletrônicos utilizados, não incluindo o custo da estufa ou da estrutura física de cultivo, os quais podem variar significativamente conforme os objetivos do projeto e os recursos disponíveis. Além disso, o valor total abrange equipamentos que foram substituídos devido a danos durante o uso, como o sensor de pH, bem como dispositivos empregados em testes preliminares que, posteriormente, foram descartados por não se adequarem ao sistema final.

Tabela 4 - Custo de todos os componentes utilizado pra montagem do sistema automatizado.

Itens	Quantidades	Preço (Dólar)
<i>PH-4502C</i>	2	64,18
<i>KS0429 keyestudio TDS Meter V1.0</i>	2	18,24
<i>DS18B20 Maxim Integrated</i>	2	3,78
<i>DHT11 Aokin</i>		6,02
<i>Módulo de relé 4 canais avr 51 pic 5v 12v</i>	2	10,24
<i>Mini Bomba Vácuo Ar 3VDC 30KPA 0.28</i>	2	34,64
<i>Display TFT 2.8 Spi, CFsunbird</i>	2	21,88
<i>ESP32 com 38 pinos</i>	4	3,65
<i>Mini bomba de aquário IPX8, Elo Imports</i>	2	7,29
Total	18	169,92

Fonte: Autor (2025).

8 CONCLUSÕES

De maneira geral, o sistema hidropônico automatizado atendeu às expectativas de funcionalidade, demonstrando eficiência no controle automatizado das variáveis pH e CE, assim como no monitoramento contínuo das demais variáveis ambientais, como temperatura da solução nutritiva, temperatura ambiente e umidade relativa.

O sistema foi testado durante um ciclo experimental com 29 dias de operação. Durante esse período, o sistema foi capaz de manter os parâmetros físico-químicos dentro das faixas ideais para o cultivo hidropônico.

Além da funcionalidade técnica, destaca-se a contribuição significativa do sistema para a manutenção dos equilíbrios químicos dinâmicos envolvidos na solução nutritiva. Através da correção automática do pH com ácidos e bases e da reposição controlada da solução diluída, foi possível minimizar oscilações bruscas no equilíbrio ácido-base e na concentração efetiva da solução, aspectos fundamentais para a disponibilidade adequada de nutrientes. A tecnologia empregada permitiu, portanto, a aplicação prática de conceitos químicos, como a absorção seletiva de íons, os princípios de neutralização, a dinâmica dos tamponamentos naturais na solução nutritiva e a relação entre condutometria e potenciometria.

Essa integração entre Química e Tecnologia reforça o potencial de sistemas automatizados não apenas como ferramentas de produção agrícola eficiente, mas também como plataformas experimentais para observação e interpretação de fenômenos químicos complexos em tempo real. Ao longo do ciclo, foi possível identificar correlações claras entre alterações no pH e CE com processos como evapotranspiração, absorção diferencial de cátions e ânions e até mesmo variações ambientais. Dessa forma, o sistema desenvolvido se mostra promissor não apenas para a produção, mas também como recurso educacional e investigativo na área de Química Aplicada à Agricultura.

9 REFERÊNCIAS

- CROP, A. J. Crop production in recirculating nutrient solution. **Scientia Horticultural**, v. 3, p. 251-258, 1975.
- ABOU-HADID, Ayman F. *et al.* Electrical conductivity effect on growth and mineral composition of lettuce plants in hydroponic system. **Strategies for Market Oriented Greenhouse Production**, p. 59-66, 1995.
- AHUJA, L. R. *et al.* Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 4, p. 699-702, 1984.
- AGROINTEC. **Sistema nido pro hidropónico inteligente para cultivo vertical**. Almería: Agrotec, 2024. Disponível em: <https://www.agrointec.com/producto/nidopro-sistema-hidroponico-inteligente-cultivo-vertical/>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- ANDRIOLO, L. *et al.* Cultivo hidropônico da alface empregando substratos: uma alternativa a NFT. **Horticultura Brasileira**, v. 22, p. 794-798, 2004.
- ASAO, T (Ed.). **Hidroponia: Uma metodologia padrão para pesquisas biológicas de plantas**. BoD – Livros sob Demanda, 2012.
- BAILEY, B.J. *et al.* Monitoramento de soluções de películas de nutrientes usando eletrodos íon-seletivos. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 40, n. 2, p. 129-142, 1988.
- BABIUCH, M.; FOLTÝNEK, P.; SMUTNÝ, P. Utilização do microcontrolador ESP32 para processamento de dados. In: INTERNATIONAL CARPATHIAN CONTROL CONFERENCE (ICCC), 20., 2019, Cracóvia-Wieliczka, Polônia. **Anais...** [S.l.]: IEEE, 2019. p. 1-6.
- BARD, A. J; FAULKNER, L. R. **Métodos eletroquímicos: fundamentos e aplicações**. 2. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2001.
- BARTRAM, J.; BALLANCE, R. **Monitoramento da qualidade da água: um guia prático para o design e implementação de estudos de qualidade da água doce e programas de monitoramento**. 1. ed. Londres: CRC Press, 1996.
- BLISKA, J. A.; HONÓRIO, S. L. **Alface (*Lactuca sativa* L.): distintos sistemas de produção, conservação e avaliação pós-colheita**. 1998. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.p. 103.
- CARRIJO, A. O. *et al.* Princípios de nutrição mineral, formulação e manejo da solução nutritiva. **Princípios de Hidroponia**. Circular Técnica 22. Embrapa v. 22, p. 10-18, 2000
- CASTELLANE, P. D.; ARAÚJO, J. A. C. **Cultivo sem solo: hidroponia**. Jaboticabal: FUNEP, 1995. p. 43.

CRNOGORAC, S. Electric conductivity of water extracts from soil as a measure of their ionic strength. **NASA Technical Translation**. Washington, DC: NASA, 1973. v. 6.

DAUD, M.; HANDIKA, V.; BINTORO, A. Design and realization of fuzzy logic control for ebb and flow hydroponic system. **International Journal of Science and Technology Research**, v. 7, p. 138–144, 2018.

DE CARLI, C. R. **Embrapa: precursora da parceria público-privada no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005.p. 86.

DE MENEZES, J; FRANCISCO, O. G; MARTINS, S. R; FERNANDES, H. S. Crescimento e avaliação nutricional da alface cultivada em" NFT" com soluções nutritivas de origem química e orgânica. **Horticultura Brasileira**, v. 22, p. 632-637, 2004.

OLIVEIRA, A. C. de. Cultivo de coentro hidropônico em sistema NFT com águas de diferentes qualidades. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 24., 2020, São Cristóvão. **Anais...** São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2020.

RAMOS, C. F. V. Sistema de automatização para agricultura de precisão. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Informática) – Universidade da Madeira, Funchal, 2019.

ECOCENTER, **sistemas hidropônicos: principais tipos e categorias**. Lisboa: ecocenter, 2024. Disponível em: <https://loja.ecocenter.pt/post/sistemas-hidroponicos-principais-tipos-e-categorias>. Acessado em: 26 nov. 2024.

ECOCENTER, **vantagem e desvantagem do sistema hidropônico**. Lisboa: ecocenter, 2024. Disponível em :<https://loja.ecocenter.pt/post/sistemas-hidroponicos-principais-tipos-e-categorias>. Acessado em: 28 nov. 2024.

EGÍDIO, N. B; LEVY, B. P. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 8, p. 107-137, 2011.

FAQUIN, V; FURTINI NETO, A. E; VILELA, LAA. **Produção de alface em hidroponia**. Lavras: Minas Gerais, UFLA, 1996.

FAO - Food and agriculture organization of the united nations. **The state of world fisheries and aquaculture**, Rome: FAO, 2016. 204 p.

FERNANDES, S. R. L. "**Alexa, como vai minha plantinha?**": sistema de monitoramento inteligente utilizando assistente virtual para auxiliar no cultivo caseiro de hortaliças. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Computação)-Universidade Federal do Ceará, Campus de Quixadá, Quixadá, 85 f. 2021.

FATHIDAREHNIJEH, E. *et al.* Perspectiva atual sobre estratégias de manejo de soluções nutritivas para melhorar a eficiência do uso de nutrientes e água em sistemas hidropônicos. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 104, n. 2, p. 88-102, 2023.

FURLANI, P. R. **Cultivo de alface pela técnica de hidroponia – NFT**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1995. p. 18. (Documentos IAC, 55).

FURLANI, P.R. **Instruções para o cultivo de hortaliças de folhas pela técnica de hidroponia – NFT**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1998. 30p. (Documentos IAC, 168).

FERENTINOS, K. P; ALBRIGHT, L. D. Detecção e diagnóstico de falhas em hidroponia de calha profunda usando ferramentas computacionais inteligentes. **Biosystems Engineering**, v. 84, n. 1, p. 13-30, 2003.

FURLANI, P.R. **Cultivo de alface pela técnica de hidroponia NFT**. Campinas: IAC, p.18. (IAC. Boletim Técnico, 55) 1995.

FURLANI, P.R. *et al.* **Nutrição mineral de hortaliças, preparo e manejo de soluções nutritivas**. Agropecuário, Belo Horizonte, v.20, n.200/201, p.90-98, 1999.

GRAVES, W. R. **Hydroponic Plant Culture as a Method for Studying Plant Mineral Nutrition**. HortScience, v. 18, n. 5, p. 595-598, 1983.

GREENPOWER. **Fotoperíodo: como aplicar em seu cultivo**. Santa Catarina: Greenpower, 2025. Disponível em: <https://greenpower.net.br/blog/fotoperiodo/>. Acesso em: 25 jan. 2025

GILLANI, S. A. *et al.* **Hydroponics: Soilless agriculture and future of farming**. Procedia Computer Science, 217, 11–19, 2023.

GOTO, R., GUIMARÃES, V.F., ECHER, M.M. **Fertirrigação– flores, frutas e hortaliças**. Agropecuária, Guaíba, 2001.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **A arte da eletrônica**. 3. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2015.

JOÃO, I. **CoolFarm attends the biggest international retail fair EuroShop 2017 in Germany**. Medium, Lisbon, 22 mar. 2017. Disponível em: <https://medium.com/@coolfarm/coolfarm-attends-the-biggest-international-retail-fair-euroshop-2017-in-germany-f03eed812f9d>. Acesso em: 15 jan. 2025.

KLAASSEN, Pieter. **Condutividade Elétrica: Por que é importante**. Canna Reino Unido: 5 jun. 2012. Disponível em: <https://www.canna-uk.com/articles/electrical-conductivity-why-it-matters> . Acesso em: 3 dez 2024.

KELLY, N *et al.* A promoção do crescimento da alface sob uma integral de luz diária crescente depende da combinação da densidade do fluxo de fótons fotossintéticos e do fotoperíodo. **Scientia Horticulturae** , v. 272, p. 109565, 2020.

- KUDIRKA, G. *et al.* Precise management of hydroponic nutrient solution pH: The effects of minor pH changes and MES buffer molarity on lettuce physiological properties. **Horticulturae**, v. 9, n. 7, p. 837, 2023.
- LEMOS, L. B; ZUFFO, C. A **Circuitos e Dispositivos Eletrônicos: Projetos e Aplicações**. São Paulo: Blucher, 2019.
- LUZ, J. M. Q.; GUIMARÃES, S. T. M. R; KORNDÖRFER, G. H. **Produção hidropônica de alface em solução nutritiva com e sem silício**. Horticultura Brasileira, v. 24, p. 295-300, 2006.
- MADAKAM, S. *et al.* **Internet das Coisas (IoT): Uma revisão da literatura**. Revista de Informática e Comunicações, v. 05, pág. 164, 2015.
- MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Agronômica Ceres, São Paulo, 2006.
- MARSCHNER, H. **Nutrição Mineral de Plantas Superiores**. 3. ed. San Diego: Academic Press, 2012.
- MARTINEZ, H.E.P. **O uso do cultivo hidropônico de plantas em pesquisa**. Viçosa: UFV. p. 61. Caderno Didático, n.1. 2002.
- MENEGAES, J. *et al.* **Produção sustentável de alimentos em cultivo hidropônico**. Revista Monografias Ambientais, Santa Maria, v. 14, n. 3, p. 102-108, set-dez. 2015.
- MEDINA, P. V. L *et al.* **Perda na qualidade da alface (*Lactuca sativa* L.) durante o armazenamento**: Relação entre as mudanças metabólicas aminoácido, proteína, clorofila, deterioração, Brasil. Revista Ceres, v. 29, 1982.
- MONTEIRO FILHO, A. *et al.* **Cultivo hidropônico de cultivares de alface em soluções nutritivas organominerais otimizadas com a ferramenta SOLVER**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.18, n.4, p.417-424, 2014.
- NIELSEN, N. E. **Produção de culturas em solução nutritiva recirculante de acordo com o princípio da regeneração**. Lunteren, The Netherlands. Proceedings... Lunteren : International Society for Soilless Culture, p.421-446. 1984.
- NETO, E. B. E; BARRETO, L. P. As técnicas de hidroponia. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 8, p. 107-137, 2012.
- NOGUEIRA FILHO, H.; MARIANI, O.A. **Estruturas para produção de alface hidropônica**. In: SANTOS, O. (ed.). Hidroponia da alface. Santa Maria: UFSM, p.102-110. 2000.

NOSOILSOLUTIONS. **Diferentes sistemas hidropônicos e técnicas de jardinagem.**

Estados unidos: nosoilsolutions,2025. Disponível em:

<https://www.nosoilsolutions.com/hydro-systems/hydroponic-systems/page/4/>. Acesso em 27 jan. 2025.

RAMOS, C. F. V. **Sistemas de Automação para Agricultura de Precisão.** Projeto de mestrado (Mestrado em Engenharia Informática) – Universidade da Madeira, Portugal, 2019.

RESH, H. M. **Hydroponic Food Production: A Definitive Guidebook for the Advanced Home Gardener and the Commercial Hydroponic Grower.** 6. ed. Santa Bárbara: Woodbridge Press Publishing Company, 1996

RODRIGUES, L.R.F. **Cultivo pela técnica de hidroponia. Técnicas de cultivo hidropônico e de controle ambiental no manejo de pragas, doenças e nutrição vegetal em ambiente protegido.** Jaboticabal. Funep. 2002.

RUBENS, Augusto Camargo Lamparelli .**Agricultura de precisão,** embrapa.2022.

Disponível em: URL>https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/avanco-tecnologico/agricultura-de-precisao?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 03 dez. 2024.

RAVEN, Peter H. *et al.* Parâmetros ecológicos e diversidade de espécies de plantas. **The American Naturalist**, v. 102, n. 926, p. 297-306, 1968.

SANCHEZ, S. V. **Produção de hortaliças pelo método hidropônico:** balcão de tecnologias alternativas para as propriedades rurais. SEBRAE-CATI, Campinas, 1996.

SHACKELFORD, C. D.; M, M. A.; MAJESKI, M. J.; STERN, S. T. **Electrical conductivity breakthrough curves.** Geotech. Geoenviron. Eng. 1999, 125, 260–270.

PAWAR, S. T, R. A, S. KHAN E S. YADAV, "**Projeto de um sistema hidropônico automatizado habilitado para IoT usando NodeMCU e Blynk**", 5ª Conferência Internacional para Convergência em Tecnologia (I2CT) de 2019, Pune, Índia, 29 a 31 de março de 2019. IEEE.

SANTOS, O. **Hidroponia da alface.** Santa Maria: UFSM, p. 160, 2000.

SCALON, I. C. **Agricultura moderna sustentável e iot: automação de monitoramento de hidroponia.** 2022.

SEVERINO, L. S. *et al.* "**Composição química de materiais orgânicos usados em substratos para produção de mudas.**" 2006.

SILVA, O. H. da. **Agricultura Familiar: Diversidade e adaptabilidade.** Revista de Sociologia e Política, n. 12, p. 161-167, junho,1999.

SILVA, S. R. **Sistema de monitoramento e controle de energia utilizando o microcontrolador ESP32**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2021

SISTEMAS EXPRESSIF. **Manual de referência técnica do ESP32**. china: expressif, 2024. Disponível em : <https://www.espressif.com> . Acesso em: 12 dez. 2024.

HOLLER, F. J.; SKOOG, D. A.; CROUCH, S. R. **Princípios de análise instrumental**. Porto Alegre: Bookman, 2009.

SONNEVELD, C.; VOOGT, W. **Nutrição de Plantas em Culturas de Estufa**. Dordrecht: Springer, 2009.

SRUTHY, E. **Exemplos poderosos de Internet das Coisas (IoT)** . Atualizado em: 16 ago. 2020. Ajuda para teste de software. Disponível em <https://www.softwaretestinghelp.com/best-iot-examples/> . Acesso em: 3 dez. 2024.

STUMM, W.; MORGAN, J. **Química Aquática: Equilíbrios e Taxas Químicas em Águas Naturais**. 3. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 1996.

SU, H.; LEE, P. Knowledge Structure by Keyword Co-Occurrence: a first look at journal papers in technology foresight. *Scientometrics*, v. 85, n. 1, p. 65–79, jun. 2010.

ASAO, H. **A standard methodology for plant biological researches**. Croatia: InTech, 2012.

TEIXEIRA, N.T. **Hidroponia: uma alternativa para pequenas áreas. Agropecuária**, Guaíba, 1996.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TAIZ, Lincoln *et al.* **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. Artmed Editora, 2017.

UFRB. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia. **Nutrição Mineral de Plantas**. 2007.

Disponível em: <https://ufrb.edu.br/pgsolos/component/content/article/96-%20disciplina-nutricao-mineral-de-plantas>. Acesso em 19 nov. 2024.

USINAINFO, eletrônica e robótica **ESP32-WROOM-32U DevKitC V4 com Wifi e Bluetooth**. Santo Ângelo: usinainfo, 2023. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/esp32/esp32-wroom-32u-devkitc-v4-com-wifi-e-bluetooth-7077>. Acessado em: 27 nov, 2024

USINAINFO, eletrônica e robótica **Medidor de TDS Sensor de Condutividade da Água Analógico**. Santo Ângelo: usinainfo, 2023. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/outros-sensores-arduino/medidor-de-tds-sensor-de-condutividade-da-agua-analogico-8184.html>. Acessado em: 27 nov, 2024.

USINAINFO, eletrônica e robótica **Sensor de pH Arduino + Módulo de Leitura BNC PH4502** .Santo Ângelo: usinainfo, 2023.Disponível em:

<https://www.usinainfo.com.br/outros-sensores-arduino/sensor-de-ph-arduino-modulo-de-leitura-5316.html> / . Acessado em :27 nov, 2024.

10 APÊNDICE

10.1 CÓDIGO

```
#define BLYNK_PRINT Serial
#define BLYNK_TEMPLATE_ID "TMPL2mqWaTPcv"
#define BLYNK_TEMPLATE_NAME "Hidroponica"
#include <TFT_eSPI.h>
#include <DHT.h>
#include <WiFi.h>
#include <BlynkSimpleEsp32.h>
#include <HTTPClient.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#define ONE_WIRE_BUS 22
#define DHTTYPE DHT11
char auth[] = "M6cTcrZfsmF_lql-BYgsJLTiCd0mj4H0";
char ssid[32] = "WNTI";
char pass[32] = "Unifal123";
String Web_App_URL = "https://script.google.com/macros/s/AKfycbxj_bR9Id8nmWoxU3LLo6eL1VAae-
ipK4_zkzWyg1NG3NzqpQOgp8p9MOE7fmZTKFWO/exec";
String PUMP_1_State = "";
String PUMP_2_State = "";
String PUMP_3_State = "";
String PUMP_4_State = "";
const int pHAtivo = 32;
const int pHPin = 34;
const int PUMP_1_PIN = 33; // Bomba Ácida
const int PUMP_2_PIN = 25; // Bomba Básica
const int PUMP_3_PIN = 26; // Bomba Diluida
const int PUMP_4_PIN = 27; // Bomba Concentrada
const int DHTPin = 12;

float RawHigh = 79,6;
float RawLow = 8.1;
float ReferenceHigh = 80,9;
float ReferenceLow = 7.8;
float RawRange = RawHigh - RawLow;
float ReferenceRange = ReferenceHigh - ReferenceLow;

TFT_eSPI tft = TFT_eSPI();
DHT dht(DHTPin, DHTTYPE);
OneWire oneWire(ONE_WIRE_BUS);
DallasTemperature sensors(&oneWire);
float sinal_pH = 0;
float pH;
int n_pH = 0;
int nL_pH = 10000;
float LinpH = 16.161, AngpH = -0.00312
float sinal_EC = 0;
float EC;
int n_EC = 0;
int nL_EC = 8000;
float LinEC = -3,09313, AngEC = 0,006542x, xcubo = 7E-10x3, xquadrado = - 4E-06x2
float Temp;
int Humd;
char comando;
int valor;
bool bombasHabilitadas = false;
bool calibrapH = false;
bool calibraEC = false;
```

```

bool Tempo = false;
bool AtivarpH = false;
bool AtivarEc = false;
bool conectado = false;
bool dadosEnviados = false;
bool emVerificacao = false;
bool estado_anterior_bomba_1 = LOW;
bool estado_anterior_bomba_2 = LOW;
bool estado_anterior_bomba_3 = LOW;
bool estado_anterior_bomba_4 = LOW;
unsigned long ultimoCheckConexao = 0;
const unsigned long intervaloCheckConexao = 900;
unsigned long intervaloEnvio =
unsigned long intervaloEnvio = 40 * 60 * 1000;
unsigned long ultimoCiclo = 0;
const unsigned long intervaloCiclo = 2 * 60 * 1000;
unsigned long inicioVerificacao = 0;
const unsigned long duracaoVerificacao = 1 * 60 * 1000;
int t1;
unsigned long t2;
int t3;
unsigned long t4;
int t9;
unsigned long t8;
int t11;
unsigned long t10;
int t12;
unsigned long t14;
int t16;
unsigned long t17 = 0;
float h, t;
float TE;
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(PUMP_1_PIN, OUTPUT);
  pinMode(PUMP_2_PIN, OUTPUT);
  pinMode(PUMP_3_PIN, OUTPUT);
  pinMode(PUMP_4_PIN, OUTPUT);
  pinMode(pHAtivo, OUTPUT);
  pinMode(EcAtivo, OUTPUT);
  sensors.begin();
  dht.begin(); // Inicializa o sensor DHT11
  digitalWrite(PUMP_1_PIN, LOW);
  digitalWrite(PUMP_2_PIN, LOW);
  digitalWrite(PUMP_3_PIN, LOW);
  digitalWrite(PUMP_4_PIN, LOW);
  digitalWrite(pHAtivo, LOW);
  digitalWrite(EcAtivo, LOW);
  tft.init();
  tft.setRotation(3);
  tft.fillScreen(TFT_BLACK);
  intro();
}
void ControleDS18() {
  unsigned long tempoAtual = millis();
  if (!AtivarTE && (tempoAtual - ultimoCicloTE >= duracaoTE)) {

  }
}
void LeiturapH() {

```

```

sinal_pH = sinal_pH + analogRead(pHPin);
n_pH = n_pH + 1;
if (n_pH > nL_pH) {
  sinal_pH = sinal_pH / n_pH;
  if (calibrapH) {
    pH = sinal_pH;
  } else {
    pH = (LinpH + (AngpH x sinal_pH));
    n_pH = 0;
    sinal_pH = 0;
  }
}
}
}
void LeituraEC() {
  sinal_EC = sinal_EC + analogRead(ECPin);
  n_EC = n_EC + 1;
  if (n_EC > nL_EC) {
    sinal_EC = sinal_EC / n_EC;
    EC = (xcubo * (sinal_EC * sinal_EC * sinal_EC) + xquadrado * (sinal_EC * sinal_EC) + AngEC * sinal_EC
+ LinEC);
    if (EC < 0) {
      EC = 0;
    }
    n_EC = 0;
    sinal_EC = 0;
  }
}
void LeituraTE() {
  sensors.requestTemperatures();
  TE = sensors.getTempCByIndex(0);
  if (TE == DEVICE_DISCONNECTED_C) {
    TE = 0;
  }
}
void LeituraDHT() {
  h = dht.readHumidity();
  t = dht.readTemperature();
  if (isnan(h) || isnan(t)) {
    h = 0;
    t = 0;
  }
}
void ControleTempo() {
  t12 = (millis() - t14) / 1000;
  if (t12 > (intervaloEnvio / 1000)) {
    Tempo = true;
  }
}
BLYNK_WRITE(V9) {
  int value = param.asInt();
  if (value == 1) {
    bombasHabilitadas = true;
    displayNotification("Automação ON!");
    Blynk.logEvent("4520", "Automação ON!");
  } else {
    bombasHabilitadas = false;
    displayNotification("Automação OFF!");
  }
}

```

```

    Blynk.logEvent("4520", "Automação OFF!");
    Blynk.virtualWrite(V3, 1);
    Blynk.virtualWrite(V4, 1);
    Blynk.virtualWrite(V5, 1);
    Blynk.virtualWrite(V6, 1);
    Blynk.virtualWrite(V8, 1);
  }
}
BLYNK_WRITE(V3) {
  int value = param.asInt();
  if (value == 1) {
    digitalWrite(PUMP_1_PIN, LOW);
    displayNotification("Bomba Ácida Ligada!");
    Blynk.virtualWrite(V3, 1);
    Serial.println("Bomba Ácida Ligada!");
  } else {
    digitalWrite(PUMP_1_PIN, HIGH);
    displayNotification("Bomba Ácida Desligada!");
    Blynk.virtualWrite(V3, 0);
    Serial.println("Bomba Ácida Desligada!");
  }
}
void pHAcido() {
  if (pH > 6.5) {
    t1 = (millis() - t2) / 1000;

    if (t1 > 120) {
      t2 = millis();
    }
    if (t1 < 6)
      digitalWrite(PUMP_1_PIN, HIGH);
    if (conectado) {
      Blynk.virtualWrite(V3, 1);
      Blynk.logEvent("4515", "Bomba Ácida Ligada!");
    }
    Serial.print("Bomba Ácida Ligada - pH Atual: ");
    Serial.println(pH);
    displayNotification("Bomba Ácida - pH: " + String(pH, 2));

  } else {
    digitalWrite(PUMP_1_PIN, LOW);
    if (conectado) Blynk.virtualWrite(V3, 0);
  }
}
BLYNK_WRITE(V4) {
  int value = param.asInt();
  if (value == 1) {
    digitalWrite(PUMP_2_PIN, LOW); /
    displayNotification("Bomba Basica Ligada!");
    Blynk.virtualWrite(V4, 1);
    Serial.println("Bomba Basica Ligada!");
  } else {
    digitalWrite(PUMP_2_PIN, HIGH);
    displayNotification("Bomba Basica Desligada!");
    Blynk.virtualWrite(V4, 0);
    Serial.println("Bomba Basica Desligada!");
  }
}
void pHBase() {

```

```

if (pH < 5.5) {
  t3 = (millis() - t4) / 1000;
  if (t3 > 120) {
    t4 = millis();
  }
  if (t3 < 6) {
    digitalWrite(PUMP_2_PIN, HIGH);
    if (conectado) {
      Blynk.virtualWrite(V4, 1);
      Blynk.logEvent("4516", "Bomba Básica Ligada!");
    }
    Serial.print("Bomba Básica Ligada - pH Atual: ");
    Serial.println(pH);
    displayNotification("Bomba Básica - pH: " + String(pH, 2));
  } else {
    digitalWrite(PUMP_2_PIN, LOW);
    if (conectado) Blynk.virtualWrite(V4, 0);
  }
}
}
}
BLYNK_WRITE(V6) {
  int value = param.asInt();
  if (value == 1) {
    digitalWrite(PUMP_4_PIN, LOW);
    displayNotification("Bomba Concentrada Ligada!");
    Blynk.virtualWrite(V6, 1);
    Serial.println("Bomba Concentrada Ligada!");
  } else {
    digitalWrite(PUMP_4_PIN, HIGH);
    displayNotification("Bomba Concentrada Desligada!");
    Blynk.virtualWrite(V6, 0);
    Serial.println("Bomba Concentrada Desligada!");
  }
}
}
void ECconcentrado() {
  if (EC < 1.2) {
    t11 = (millis() - t10) / 1000;

    if (t11 > 120) {
      t10 = millis();
    }

    if (t11 < 6) {
      digitalWrite(PUMP_4_PIN, HIGH);
      if (conectado) {
        Blynk.virtualWrite(V5, 1);
        Blynk.logEvent("4517", "Bomba Concentrada Ligada !");
      }
      Serial.print("Bomba Concentrada Ligada - EC Atual: ");
      Serial.println(EC);
      displayNotification("Bomba Concentrada - EC: " + String(EC, 2));
    } else {
      digitalWrite(PUMP_4_PIN, LOW);
      if (conectado) Blynk.virtualWrite(V5, 0);
    }
  }
}
}
}
BLYNK_WRITE(V5) {
  int value = param.asInt();

```

```

if (value == 1) {
  digitalWrite(PUMP_3_PIN, LOW);
  displayNotification("Bomba de Diluida Ligada!");
  Blynk.virtualWrite(V5, 1);
  Serial.println("Bomba de Diluida Ligada!");
} else {
  digitalWrite(PUMP_3_PIN, HIGH);
  displayNotification("Bomba de Diluida Desligada!");
  Blynk.virtualWrite(V5, 0);
  Serial.println("Bomba Diluida Desligada!");
}
}
}
void ECDiluido() {
  if (EC > 2.1) {
    t9 = (millis() - t8) / 1000;
    if (t9 > 120) {
      t8 = millis();
    }
    if (t9 < 6) {
      digitalWrite(PUMP_3_PIN, HIGH);
      if (conectado) {
        Blynk.virtualWrite(V6, 1);
        Blynk.logEvent("4518", "Bomba Diluída Ligada!");
      }
      Serial.print("Bomba Diluída Ligada - EC Atual: ");
      Serial.println(EC);
      displayNotification("Bomba Diluída - EC: " + String(EC, 2));
    } else {
      digitalWrite(PUMP_3_PIN, LOW);
      if (conectado) Blynk.virtualWrite(V6, 0);
    }
  }
}
}
void Ligar() {
  t16 = (millis() - t17) / 1000;
  if (t16 > 3600) {
    t17 = millis();
  }
  if (t16 < 1800) {
    digitalWrite(pHAtivo, LOW);
    digitalWrite(EcAtivo, HIGH);
  }
  else if (t16 >= 1800 && t16 < 3600) {
    digitalWrite(pHAtivo, HIGH);
    digitalWrite(EcAtivo, LOW);
  }
}
}
void atualizarLeiturasComBaseNoRele() {
  if (digitalRead(pHAtivo) == LOW) {
    pH = 0;
  } else if (digitalRead(pHAtivo) == HIGH) {
    LeiturapH();
  }
  if (digitalRead(EcAtivo) == LOW) {
    EC = 0;
  } else if (digitalRead(EcAtivo) == HIGH) {
    LeituraEC();
  }
}
}
void intro() {

```

```

tft.setTextDatum(MC_DATUM);
tft.setTextColor(TFT_WHITE);
tft.setTextSize(3);
tft.drawString("HidroSmart", tft.width() / 2, tft.height() / 2 - 20);
tft.setTextSize(2);
tft.drawString("by Miguel Pereira", tft.width() / 2, tft.height() / 2 + 10);
delay(3000);
tft.fillScreen(TFT_BLACK);
tft.setTextSize(2);
tft.drawString("Orientador:", tft.width() / 2, tft.height() / 2 - 10);
tft.drawString("Pedro Orival Luccas", tft.width() / 2, tft.height() / 2 + 20);
delay(3000);
tft.fillScreen(TFT_BLACK);
}
void Tem() {
if (comando == 'F') {
int novoIntervaloMinutos = Serial.parseInt();
if (novoIntervaloMinutos > 0) {
intervaloEnvio = novoIntervaloMinutos * 1000;
Serial.println("Novo intervalo de envio ajustado para: " + String(novoIntervaloMinutos) + " Segundos")
displayNotification("Intervalo ajustado para " + String(novoIntervaloMinutos) + " Segundos ");
} else {
Serial.println("Valor inválido. O intervalo deve ser maior que 0 Segundos.");
}
}
}
void loop() {

unsigned long tempoAtual = millis();
Ligar(); //
LeituraTE();
LeiturapH();
LeituraEC();
LeituraDHT(); //
ControleTempo();
atualizarLeiturasComBaseNoRele();
Tem();

if (millis() - ultimoCheckConexao >= intervaloCheckConexao) {
ultimoCheckConexao = millis();
checkWiFiConnection();
}

if (!emVerificacao && tempoAtual - ultimoCiclo >= intervaloCiclo) {
emVerificacao = true;
inicioVerificacao = tempoAtual;
AtivarpH = true;
AtivarEc = true;
Serial.println("Iniciando verificação...");
}
if (emVerificacao) {
if (tempoAtual - inicioVerificacao <= duracaoVerificacao) {
if (AtivarEc && digitalRead(EcAtivo) == HIGH) {
LeituraEC();
if (EC < 1.2) ECconcentrado();
else if (EC > 1.9) ECDiluido();
}
if (AtivarpH && digitalRead(pHAtivo) == HIGH) {
LeiturapH();
if (pH > 6.3) pHAcido();
else if (pH < 5.5) pHBase();
}
}
}
}

```

```

    }
  } else {
    emVerificacao = false;
    ultimoCiclo = tempoAtual;
    AtivarpH = false;
    AtivarEc = false;
    Serial.println("Verificação concluída.");
  }
}
if (Tempo) {
  Serial.print(" P ");
  Serial.print(pH);
  Serial.print(" E ");
  Serial.print(EC);
  Serial.print(" T ");
  Serial.print(TE);
  Serial.print(" H ");
  Serial.print(h);
  Serial.print(" K ");
  Serial.println(t);

  if (conectado) {
    Blynk.virtualWrite(V0, pH);
    Blynk.virtualWrite(V1, EC);
    Blynk.virtualWrite(V2, TE);
    Blynk.virtualWrite(V10, h);
    Blynk.virtualWrite(V7, t);
    EnviarDadosGoogleSheets();
  }
  drawMeter(60, 60, pH, 25, "pH", "", TFT_RED);
  drawMeter(260, 60, EC, 25, "EC", "mS/cm", TFT_BLUE);
  drawMeter(60, 180, t, 100, "Temp Amb", "°C", TFT_YELLOW);
  drawMeter(260, 180, h, 100, "Umidade", "%", TFT_CYAN);
  drawMeter(160, 110, TE, 100, "Tem.Sol", "°C", TFT_GREEN);
  Tempo = false;
  t14 = millis();
}
if (Serial.available() > 0) {
  comando = Serial.read();
  comandoPHEC();

  if (comando == 'L') {
    valor = Serial.parseInt();
    nL_pH = valor;
    nL_EC = valor;
  }
  if (comando == 'A') {
    comando = 'z';
    LinpH = Serial.parseFloat();
  }
  if (comando == 'B') {
    comando = 'z';
    AngpH = Serial.parseFloat();
  }
  if (comando == 'E') {
    comando = 'z';
    LinEC = Serial.parseFloat();
  } // Coef linear para calibrar EC
  if (comando == 'C') {
    comando = 'z';
  }
}

```

```

    AngEC = Serial.parseFloat();
}

if (comando == 'P') {
    calibrapH = true;
    Serial.println("Calibração de pH habilitada");
}
if (comando == 'R') {
    calibrapH = false;
    Serial.println("pH Calibrado");
}
if (comando == 'Z') {
    calibraEC = true;
    Serial.println("Calibração de EC habilitada");
}
if (comando == 'X') {
    calibraEC = false;
    Serial.println("EC Calibrado");
}
if (comando == '1') {
    controleBombaManual(PUMP_1_PIN, "Bomba Ácida");
} else if (comando == '2') {
    controleBombaManual(PUMP_2_PIN, "Bomba Básica");
} else if (comando == '3') {
    controleBombaManual(PUMP_3_PIN, "Bomba Concentrada");
} else if (comando == '4') {
    controleBombaManual(PUMP_4_PIN, "Bomba Diluída");
}
}
}
}

void conectarWiFi() {
    displayNotification("Conectando ao Wi-Fi...");
    WiFi.begin(ssid, pass);
    int tentativas = 0;
    while (WiFi.status() != WL_CONNECTED && tentativas < 10) {
        delay(1000); // Espera 1 segundo entre as tentativas
        tentativas++;
    }
    if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
        conectado = true;
        displayNotification("HidroSmart Conectada!");
        Serial.println("HidroSmart Conectada!");
        Blynk.begin(auth, ssid, pass); // Conecta ao Blynk
    } else {
        displayNotification("Falha na conexão!");
        conectado = false;
    }
}

void checkWiFiConnection() {
    if (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
        displayNotification("Conexão Wi-Fi perdida! Tentando reconectar...");
        conectarWiFi();
    }
}

void EnviarDadosGoogleSheets() {
    if (conectado) {
        checkWiFiConnection();
        String Send_Data_URL = Web_App_URL + "?sts=write";
        Send_Data_URL += "&ph=" + String(pH);
        Send_Data_URL += "&ec=" + String(EC);
    }
}

```

```

Send_Data_URL += "&te=" + String(TE);
Send_Data_URL += "&temp=" + String(t);
Send_Data_URL += "&humd=" + String(h);
if (digitalRead(PUMP_1_PIN) == HIGH && estado_anterior_bomba_1 == LOW) {
    PUMP_1_State = "ON";
    estado_anterior_bomba_1 = HIGH;
} else if (digitalRead(PUMP_1_PIN) == LOW && estado_anterior_bomba_1 == HIGH) {
    PUMP_1_State = "";
    estado_anterior_bomba_1 = LOW; // Atualiza o estado
}
if (digitalRead(PUMP_2_PIN) == HIGH && estado_anterior_bomba_2 == LOW) {
    PUMP_2_State = "ON";
    estado_anterior_bomba_2 = HIGH;
} else if (digitalRead(PUMP_2_PIN) == LOW && estado_anterior_bomba_2 == HIGH) {
    PUMP_2_State = "";
    estado_anterior_bomba_2 = LOW;
}
if (digitalRead(PUMP_3_PIN) == HIGH && estado_anterior_bomba_3 == LOW) {
    PUMP_3_State = "ON";
    estado_anterior_bomba_3 = HIGH;
} else if (digitalRead(PUMP_3_PIN) == LOW && estado_anterior_bomba_3 == HIGH) {
    PUMP_3_State = "";
    estado_anterior_bomba_3 = LOW;
}
if (digitalRead(PUMP_4_PIN) == HIGH && estado_anterior_bomba_4 == LOW) {
    PUMP_4_State = "ON";
    estado_anterior_bomba_4 = HIGH;
} else if (digitalRead(PUMP_4_PIN) == LOW && estado_anterior_bomba_4 == HIGH) {
    PUMP_4_State = "";
    estado_anterior_bomba_4 = LOW;
}
Send_Data_URL += "&pump1=" + PUMP_1_State;
Send_Data_URL += "&pump2=" + PUMP_2_State;
Send_Data_URL += "&pump3=" + PUMP_3_State;
Send_Data_URL += "&pump4=" + PUMP_4_State;
HTTPClient http;
int httpCode = 0;
int maxRetries = 3;
int retryCount = 0;
while (retryCount < maxRetries) {
    http.begin(Send_Data_URL.c_str());
    httpCode = http.GET();
    if (httpCode > 0) {
        String payload = http.getString();
        displayNotification("Dados enviados.");
        dadosEnviados = true;
        break;
    } else {
        displayNotification("Erro ao enviar. Código: " + String(httpCode));
        retryCount++;
    }
}
http.end();
}
if (retryCount == maxRetries) {
    displayNotification("Falha ao enviar os dados após " + String(maxRetries) + " tentativas.");
    dadosEnviados = false;
}
} else {
    displayNotification("Wi-Fi não conectado.");
}
}

```

```

}
void controleBombaManual(int pin, String bomba) {
  if (digitalRead(pin) == LOW) { // Se a bomba estiver desligada
    digitalWrite(pin, HIGH); // Liga a bomba
    displayNotification(bomba + " Ligada!");
    Serial.println(bomba + " Ligada!");
  } else {
    digitalWrite(pin, LOW);
    displayNotification(bomba + " Desligada!");
    Serial.println(bomba + " Desligada!");
  }
}
void desligaTodasBombas() {
  digitalWrite(PUMP_1_PIN, LOW);
  digitalWrite(PUMP_2_PIN, LOW);
  digitalWrite(PUMP_3_PIN, LOW);
  digitalWrite(PUMP_4_PIN, LOW);
}
void drawArc(int x, int y, int r, int startAngle, int endAngle, uint16_t color) {
  for (int i = startAngle; i <= endAngle; i++) {
    float angleRad = i * 3.14159265 / 180;
    int x1 = x + r * cos(angleRad);
    int y1 = y + r * sin(angleRad);
    int x2 = x + (r - 10) * cos(angleRad);
    int y2 = y + (r - 10) * sin(angleRad);
    tft.drawLine(x1, y1, x2, y2, color);
  }
}
void drawMeter(int x, int y, float value, float maxValue, const char* label, const char* unit, uint16_t color) {
  int radius = 55;
  int angle = map(value * 1000, 0, maxValue * 1000, -120, 120);
  drawArc(x, y, radius, -120, 120, TFT_DARKGREY);
  drawArc(x, y, radius, -120, angle, color);
  tft.fillCircle(x, y, radius - 15, TFT_BLACK);
  tft.setTextDatum(MC_DATUM);
  tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);
  tft.setTextSize(3);
  tft.drawFloat(value, 2, x, y - 10);
  tft.setTextSize(2);
  tft.setTextColor(TFT_YELLOW);
  tft.drawString(unit, x, y + 12);
  tft.setTextSize(2);
  tft.setTextColor(TFT_WHITE);
  tft.drawString(label, x, y + 22);
}
void displayNotification(String message) {
  tft.fillRect(0, 0, tft.width(), 30, TFT_BLACK);
  tft.setTextDatum(TC_DATUM);
  tft.setTextColor(TFT_WHITE, TFT_BLACK);
  tft.setTextSize(2);
  tft.drawString(message, tft.width() / 2, 10);
  delay(2000);
  tft.fillRect(0, 0, tft.width(), 30, TFT_BLACK);
}

```