Sistema Automático de Monitoramento e Atuação para Produção Hidropônica

Camila C. Cáceres[1], Luiz Gustavo S. S. Junqueira[1], Hana Karina S. Rubinsztejn[1]

[1]Faculdade de Computação (FACOM) Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) – Campo Grande, MS – Brasil
cardoso.camila@ufms.br

Resumo: Os impactos das mudanças climáticas afetam diretamente a agricultura por meio da degradação do solo, escassez de água e aumento das temperaturas. Nesse contexto, a hidroponia surge como alternativa sustentável. Este trabalho apresenta um sistema automático de monitoramento e atuação para cultivo hidropônico NFT, utilizando ESP32, sensores de baixo custo e MQTT, contribuindo para maior eficiência no cultivo e potencial de automação escalável.

Palavras-chave: Hidroponia; Internet das Coisas (IoT); ESP32; Monitoramento Automatizado; MQTT

INTRODUÇÃO

Atualmente, de acordo com o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), os impactos ambientais decorrentes das mudanças climáticas representam um dos maiores desafios da sociedade contemporânea. Esses efeitos têm se refletido diretamente no cotidiano das pessoas, afetando desde a disponibilidade de recursos naturais e a produtividade agrícola até o equilíbrio ambiental.

Observando o cenário atual da agricultura, nota-se que ainda predomina o cultivo em solo. Dos aproximadamente 1,6 bilhões de hectares de terras agrícolas no mundo, apenas cerca de 95 mil hectares estão sob sistemas *Soilless Farming* (SLF), correspondendo a apenas 3,5% da produção agrícola total (Lakhiar et al. 2025). Esse modelo de cultivo é fortemente afetado pelas variações climáticas, uma vez que depende diretamente dos nutrientes presentes e da qualidade do solo.

Em complemento, o setor agrícola é responsável por aproximadamente 50% das emissões globais de óxido nitroso (N_2O) e 60% das emissões de metano (CH_4), sendo o solo uma das principais fontes desses gases (Pomoni et al. 2023).

Segundo projeções da FAO, a população mundial deverá atingir 9,7 bilhões de pessoas até 2050, demandando um aumento de 60% na produção global de alimentos. Concomitantemente, a urbanização acelerada reduz as áreas agricultáveis disponíveis (Jan et al. 2020) . Diante desse cenário, torna-se imperativa a adoção de sistemas de cultivo mais eficientes e que ocupem menos espaço físico.

Uma alternativa promissora é a agricultura sem solo, em que os nutrientes e condições ideais para o desenvolvimento das culturas são controlados e distribuídos por meio da água e do ar. Nesse contexto, a hidroponia destaca-se como uma solução sustentável. Estudos indicam que sistemas hidropônicos podem reduzir o consumo de água em até 90% em comparação com métodos convencionais de cultivo em solo (Jan et al. 2020, Rajaseger et al. 2023).

A hidroponia é um sistema de produção agrícola no qual o desenvolvimento das plantas ocorre por meio de soluções nutritivas balanceadas, dispensando o uso do solo natural (Jensen 1997). Entre os principais sistemas hidropônicos, destacam-se a Técnica do Filme Nutritivo (NFT - *Nutrient Film Technique*), a Cultura em Água Profunda (DWC - *Deep Water Culture*) e a aeroponia. Neste trabalho, adotou-se o sistema NFT, caracterizado por ser um sistema fechado que permite a recirculação eficiente da solução nutritiva.

Paralelamente, a Internet das Coisas (IoT) tem se consolidado como uma tecnologia transformadora em diversos setores (Rose et al. 2015). A integração entre sistemas hidropônicos e IoT representa uma sinergia particularmente promissora. Sistemas hidropônicos equipados com sensores de pH, condutividade elétrica, temperatura, umidade e nível da solução nutritiva, conectados por meio de redes sem fio, podem operar de forma autônoma, ajustando continuamente as condições de cultivo com base em dados coletados em tempo real (Kim et al. 2020).

Diante desse contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema automático de monitoramento e atuação para produção hidropônica baseado na técnica NFT. O sistema desenvolvido busca combinar eficiência produtiva, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica, caracterizando-se por uma arquitetura modular e escalável de baixo custo. A implementação utiliza microcontroladores ESP32, sensores de baixo custo e o protocolo MQTT para comunicação, sendo organizada em três níveis de controle: geral, reservatório e bancada.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema NFT é comumente implementado por meio de bancadas elevadas com calhas inclinadas que permitem o escoamento da solução nutritiva sobre as raízes das plantas. O sistema de monitoramento proposto é composto por três componentes principais: sistema de controle geral, sistema de controle do reservatório e sistema de controle da bancada. Os componentes da arquitetura incluem sensores, atuadores, microcontroladores e uma aplicação web, responsáveis pelo monitoramento das variáveis de cultivo e pela configuração do sistema.

A arquitetura foi projetada de forma modular e escalável, permitindo expansão conforme a escala da produção: é possível adicionar múltiplos sistemas de controle de bancadas em uma mesma estufa e integrar diversas estufas sob um único sistema de controle geral. Essa abordagem facilita a adaptação do sistema a estruturas maiores e mais complexas, como ilustrado na Figura 1:

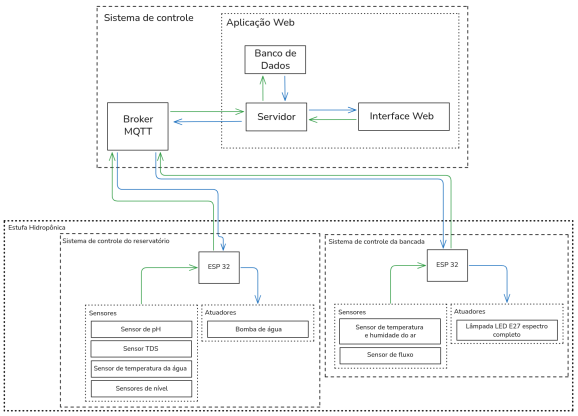

Figura 1. Diagrama do sistema de controle.

O **sistema de controle geral** atua como o núcleo de coordenação, hospedando o *broker* MQTT responsável pela comunicação entre todos os componentes. Além do *broker*, executa uma aplicação web que permite analisar os dados coletados, configurar parâmetros ideais da solução nutritiva e acionar manualmente os atuadores. O *broker* MQTT foi configurado utilizando o Eclipse Mosquitto com protocolo MQTT v5, executado como contêiner Docker em um Raspberry Pi 3B+.

O **sistema de controle do reservatório** monitora os parâmetros da solução nutritiva e controla a bomba de circulação. Utiliza um ESP32, sensor capacitivo de nível sem contato (XKC-Y25-V), sensor de sólidos totais dissolvidos (TDS Meter V1.0), sensor de pH analógico (PH4502C), sensor de temperatura digital (DS18B20) e bomba submersa 600 L/h.

O sistema de controle da bancada realiza o monitoramento individual de cada bancada, medindo o fluxo de água, a temperatura e a umidade do ar, além de controlar a iluminação artificial. Utiliza um ESP32, sensor DHT22, sensor de fluxo YF-S201 e lâmpada LED E27 de espectro completo. Esse módulo foi projetado para operar em uma única bancada, podendo ser replicado conforme o número de bancadas da produção.

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

A placa de desenvolvimento usada para os sistemas de bancada e reservatório é a MH-ET LIVE ESP32 MiniKit, escolhida por sua praticidade na integração, visto que expõe de forma acessível as funcionalidades do chip ESP32-WROOM-32. O núcleo da placa é o microcontrolador ESP32-WROOM-32, desenvolvido pela Espressif Systems. Trata-se de um SoC (\textit{System on Chip}) que integra conectividade Wi-Fi e Bluetooth em um único chip, possuindo dois núcleos Xtensa LX6 de até 240 MHz, 520 KB de memória SRAM e suporte a até 4 MB de memória \textit{flash} externa. O ESP32 disponibiliza conversores ADC e DAC, sensores internos e suporte a diversas interfaces de comunicação (I2C, SPI, UART), fundamentais para integração com os sensores e atuadores utilizados neste projeto. O número de portas digitais e analógicas disponíveis atende às demandas do projeto, permitindo a conexão simultânea de todos os sensores e atuadores sem necessidade de componentes adicionais.

O **sensor de temperatura DS18B20** é um sensor digital à prova d'água utilizado para monitorar a temperatura da solução nutritiva. Possui precisão de ±0,5°C na faixa de -10°C a +85°C e utiliza o protocolo One-Wire para comunicação, que permite a conexão de múltiplos sensores em uma única porta digital do microcontrolador. É necessário um resistor pull-up de 4,7 kΩ conectado entre a linha de dados e a alimentação.

O **sensor TDS Meter V1.0** mede a concentração de sólidos dissolvidos totais na solução nutritiva. É

composto por uma sonda com dois eletrodos, que fica submersa na água, e um módulo de processamento analógico que mede a condutividade elétrica (EC). O microcontrolador faz a leitura do módulo por meio de uma porta com conversor analógico-digital (ADC) de 12 bits, utilizando a mediana de 30 leituras consecutivas. A conversão para condutividade elétrica em µS/cm é realizada com compensação de temperatura conforme a equação:

$$EC = 133{,}42 \cdot Vc^3 - 255{,}86 \cdot Vc^2 + 857{,}39 \cdot Vc \quad (1)$$

onde Vc = Vmedido / (1 + 0,02 · (T − 25)) é a tensão compensada pela temperatura. Os coeficientes do polinômio foram obtidos a partir de calibração fornecida pelo fabricante do módulo.

O **sensor DHT22** é um sensor digital de temperatura e umidade do ar que combina um sensor capacitivo para umidade e um termistor para temperatura. Opera entre 3,3V e 5,5V, com faixa de medição de -40°C a +80°C e de 0% a 100% de umidade relativa, com precisão de ±0,5°C para temperatura e ±2% para umidade.

O **sensor de fluxo YF-S201** utiliza o efeito Hall para medir a vazão da solução nutritiva nas bancadas. O sensor funciona através de uma hélice interna acoplada a um sensor de efeito Hall que gera pulsos digitais proporcionais à rotação. A conversão para litros por minuto é dada por Q = f / K, onde f é a frequência dos pulsos e K = 7,5 pulsos/L é o fator de calibração.

O **sensor de pH PH-4502C** é composto por um módulo e uma sonda submersível que mede a acidez ou alcalinidade da solução nutritiva através de uma membrana de vidro sensível a íons H+. O módulo fornece uma saída analógica entre 0 e 3,3V que pode ser lida pelo ADC do ESP32. Após calibração com soluções tampão de pH 4,01 e 6,86, obteve-se a fórmula de conversão: pH = −4,2537 · V + 17,4943.

$$pH = -4{,}2537 \cdot V + 17{,}4943 \quad (2)$$

O **sensor XKC-Y25-V** é um sensor capacitivo sem contato utilizado para monitorar o nível da solução nutritiva no reservatório. Diferentemente dos sensores convencionais que necessitam contato direto com o líquido, este sensor detecta variações na capacitância causadas pela presença de líquido próximo à sua superfície sensível. Por não possuir partes móveis, é menos suscetível a travamentos e falhas mecânicas comuns em boias convencionais. Sua sensibilidade pode ser ajustada através de um potenciômetro presente no módulo.

Os atuadores incluem uma **bomba submersa PL-202** com vazão máxima de 600 L/h, operando com alimentação de 110V ou 220V AC, controlada pelo ESP32 por meio de um módulo relé com isolamento elétrico entre o circuito lógico e a carga em corrente alternada. **A lâmpada LED E27** de espectro completo, composta por LEDs azuis e vermelhos nos comprimentos de onda mais relevantes para o processo fotossintético, é igualmente controlada por relé para automatização dos ciclos de luz.

A troca de informações entre os módulos é baseada no protocolo MQTT, em razão de sua leveza e adequação a aplicações IoT. O *broker* é executado localmente no módulo de controle geral, com autenticação por usuário e senha. A estrutura de tópicos adotada é:

- greenhouse/<id>/sensors
- greenhouse/<id>/commands
- bench/<id>/sensors
- bench/<id>/commands

onde os identificadores correspondem ao endereço MAC do dispositivo, garantindo identificação única na rede. As bancadas não incluem o identificador da estufa em seus tópicos, permitindo transferência entre estufas sem alterações no firmware.

Todas as mensagens trafegam em formato JSON. O módulo do reservatório publica dados de pH, condutividade elétrica, temperatura da água, estado dos sensores de nível e estado da bomba. O módulo das bancadas publica o fluxo de água, temperatura e umidade do ar, e estado da iluminação. As mensagens são enviadas a cada 15 segundos.

O sistema realiza o cadastro automático de novas estufas e bancadas assim que os módulos iniciam a publicação via MQTT. Ao receber uma mensagem, o servidor verifica se o identificador já está registrado e, caso contrário, cria o registro automaticamente, permitindo expansão *plug-and-play*.

A interface foi desenvolvida utilizando Elixir com o *framework* Phoenix LiveView, que permite criar interfaces web dinâmicas e reativas mantendo toda a lógica no lado do servidor, via conexão WebSocket persistente. Toda a aplicação executa dentro de um único nó BEAM, onde o cliente MQTT, a lógica de negócio e os processos do LiveView operam de forma integrada. O código-fonte da aplicação web e dos firmwares está disponível em repositório público no GitHub.

Para a persistência dos dados, é utilizado PostgreSQL, armazenando dispositivos, configurações, leituras dos sensores e cronogramas de atuação. Todos os dados publicados são armazenados integralmente, favorecendo análises históricas.

A tela principal da aplicação web, apresentada na Figura 2, exibe todas as estufas cadastradas no

sistema, em formato tabular, com os valores mais recentes de cada parâmetro monitorado. Para facilitar a análise visual, é utilizada codificação por cores com base nos valores ideais configurados para a estufa: verde para condições adequadas, amarelo para valores próximos aos limites de alerta e vermelho para condições críticas.

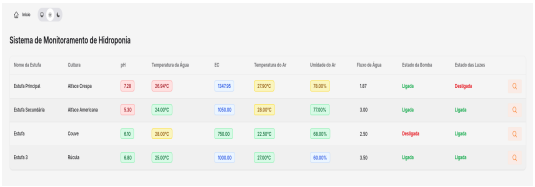

Figura 2. Página inicial do sistema.

Ao acessar uma estufa, o usuário é redirecionado para a interface detalhada mostrada na Figura 3, que apresenta gráficos históricos de todos os parâmetros monitorados, além de uma tabela contendo as leituras mais recentes da estufa e de suas bancadas. Nessa página, também estão disponíveis controles manuais para o acionamento da bomba de circulação e do sistema de iluminação, por meio de botões liga/desliga.

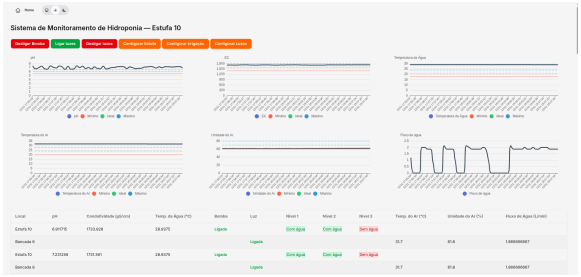

Figura 3. Página de detalhes da estufa.

A aplicação permite ainda a configuração de faixas ideais (mínimo, ideal e máximo) para cada parâmetro, bem como cronogramas de irrigação e iluminação com definição de horários, tempos ligado/desligado e dias da semana.

Os valores ideais padrão foram definidos com base na literatura (Jones Jr 2016, Resh 2022), conforme a Tabela 1.

Tabela 1. Valores de referência para cultivo hidropônico. Fonte: Adaptado de (Jones Jr, 2016) e (Resh, 2022).

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

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A validação do sistema foi realizada em etapas, iniciando com testes individuais dos sensores, seguindo para a avaliação da integração dos módulos e, por fim, testes em operação real na estufa.

Os testes iniciais foram conduzidos com cada sensor operando isoladamente. O sensor de pH, calibrado com soluções tampão de pH 4,01 e 6,86, apresentou desvio inferior a ±0,2 unidades de pH em relação a um medidor comercial, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Comparação de pH entre o sensor PH-4502C e o medidor comercial.

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

A comparação do sensor TDS Meter V1.0 com um medidor comercial de condutividade elétrica foi realizada em diferentes concentrações de água com o adubo líquido utilizado na solução nutritiva. Os resultados demonstraram desvio inferior a 0,15 mS/cm, conforme a Tabela 3.

Tabela 3. Comparação de condutividade elétrica (EC) entre o sensor TDS Meter V1.0 e o medidor comercial.

TDS Meter V1.0 (mS/cm)	Comercial (mS/cm)
0.350	0.377
0.477	0.483
0.803	0.809
0.910	0.890
1.100	1.030
1.490	1.350
1.770	1.700

Na integração dos sensores no módulo do reservatório, foram observadas interferências eletromagnéticas que afetaram o sensor de pH. Essa instabilidade tornou-se mais acentuada conforme aumentava a condutividade da solução, indicando correlação direta com o funcionamento do sensor de EC, que injeta corrente elétrica na água.

O módulo PH-4502C baseia seu funcionamento na diferença de potencial gerada pela concentração de íons H^+. Quando o sensor de EC opera em paralelo, a

corrente introduzida altera a distribuição de cargas e potenciais elétricos, interferindo no eletrodo de pH. Técnicas de filtragem digital foram empregadas para reduzir a instabilidade: maior espaçamento entre amostragens e cálculo de média com descarte de valores extremos em 50 leituras consecutivas. Os demais sensores (DHT22, YF-S201, XKC-Y25-V e DS18B20) mantiveram estabilidade e funcionamento adequado em conjunto.

Para validação do sistema, foi utilizada uma estrutura de produção hidropônica indoor em pequena escala, na qual foram plantadas nove mudas de alface do tipo crespa. A Tabela 4 apresenta a média dos valores medidos nos últimos sete dias do experimento.

Tabela 4. Valores médios medidos nos últimos dias de operação do sistema.

Período	Temp. água (C°)	EC (µS/cm)	pH	Temp. ar (C°)	Umid. ar (%)
09/11 12h-24h	26,66	1751	5,88	28,78	70,21
10/11 00h–12h	26,05	1558	5,88	27,28	70,39
10/11 12h–24h	27,58	1158	5,90	29,49	68,52
11/11 00h–12h	26,35	985	5,90	27,61	76,92
11/11 12h–24h	27,03	956	5,85	29,33	67,91
12/11 00h–12h	29,16	956	5,52	29,16	74,82
12/11 12h–24h	28,86	1362	6,72	31,15	67,41
13/11 00h–12h	28,05	1547	7,09	28,98	77,76
13/11 12h–24h	27,55	1473	7,30	28,55	85,91
14/11 00h–12h	26,57	1302	7,55	26,82	97,02
14/11 12h–24h	26,46	1169	7,71	27,07	94,72
15/11 00h–12h	25,81	1103	7,85	26,24	98,91
15/11 12h–24h	26,46	992	7,74	26,24	91,34
16/11 00h–12h	25,89	883	7,79	26,38	96,15
16/11 12h–24h	26,60	774	7,51	28,22	77,33

A temperatura da água, a temperatura do ar e a umidade relativa permaneceram em faixas relativamente estáveis, com variações compatíveis com um sistema \textit{indoor} sem controle ativo de climatização, mantendo-se próximas das faixas recomendadas (Tabela 1).

A condutividade elétrica apresentou tendência de queda gradual, refletindo o consumo de nutrientes pelas plantas. Observa-se o efeito da reposição de adubo realizada na tarde do dia 12/11, quando a condutividade volta a se elevar. Em relação ao pH, nota-se elevação progressiva dos valores, porém, conforme discutido, as leituras são influenciadas por interferências da operação simultânea do sensor de EC, devendo os valores absolutos ser interpretados com cautela.

As Figuras 4 à 7 mostram a evolução das mudas ao longo do cultivo. Além das diferenças de iluminação — que favoreceram tanto a fileira inferior, exposta a maior luz solar, quanto o canal central, diretamente sob a luz de crescimento — observa-se que as plantas mantiveram desenvolvimento uniforme, coloração verde consistente e folhas íntegras ao longo do período. Não houve indícios visuais de pragas, danos foliares ou outros problemas aparentes, indicando condições adequadas de cultivo durante o experimento.

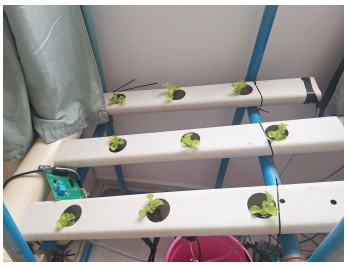

Figura 4. 05/11/25 - Plantio.



Figura 5. 08/11/25.

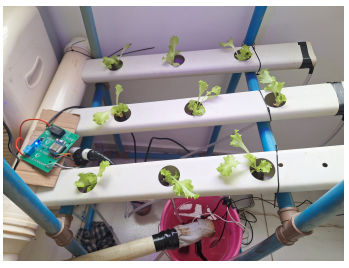

Figura 6. 12/11/25.

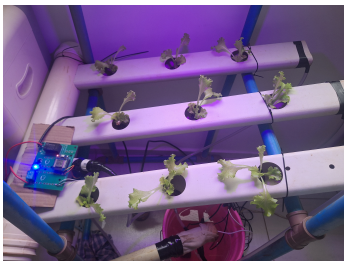

Figura 7. 14/11/25

Do ponto de vista econômico, o custo de implementação por módulo do reservatório é de R$ 195,06 e por módulo de bancada é de R$ 98,57, totalizando aproximadamente R$ 293,63 para um sistema completo com uma bancada. Este valor é inferior ao sensor comercial utilizado para validação (R$ 429,00). Em relação ao consumo energético, o sistema apresentou valores médios de apenas 0,03 kWh/dia para o módulo do reservatório e 0,026 kWh/dia para o módulo das bancadas, reforçando a viabilidade para operação contínua com baixo custo.

CONCLUSÃO

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

O sistema diferencia-se dos trabalhos da literatura por: (1) arquitetura hierárquica em três níveis com cadastro automático de novos módulos via MQTT; (2) utilização exclusiva do ESP32 em todos os módulos, garantindo padronização; (3) distribuição de sensores por bancada, permitindo monitoramento localizado; e (4) aplicação web em tempo real com visualização histórica e configuração de cronogramas.

Os testes em ambiente real, utilizando alface crespa, confirmaram a viabilidade prática do sistema, que manteve parâmetros dentro das faixas recomendadas e reduziu significativamente a necessidade de intervenção humana.

Algumas limitações foram identificadas: deslocamento nas leituras de pH devido à interferência eletroquímica do sensor de EC; dependência de Wi-Fi local; e ausência de controle automático de reposição de nutrientes. Como trabalhos futuros, destacam-se: avaliação de sensores de pH com maior imunidade a interferências; implementação de controle automático de adição de nutrientes; investigação de tecnologias como LoRaWAN e Zigbee para áreas maiores; e integração com visão computacional para detecção de pragas.

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

REFERÊNCIAS

JAN, S.; RASHID, Z.; AHNGAR, T. A.; IQBAL, S.; NAIKOO, M. A.; MAJEED, S.; BHAT, T. A.; GUL, R.; NAZIR, I. Hydroponics–a review. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, v. 9, n. 8, p. 1779–1787, 2020.

JENSEN, M. H. Hydroponics. HortScience, v. 32, n. 6, p. 1018–1021, 1997.

JONES JR, J. B. Hydroponics: a practical guide for the soilless grower. Boca Raton: CRC Press, 2016.

KEYESTUDIO. KS0429 Keyestudio TDS Meter V1.0. 2024.

KIM, W.-S.; LEE, W.-S.; KIM, Y.-J. A review of the applications of the internet of things (IoT) for agricultural automation. Journal of Biosystems Engineering, v. 45, n. 4, p. 385–400, 2020.

LAKHIAR, I. A.; YAN, H.; SYED, T. N.; ZHANG, C.; SHAIKH, S. A.; RAKIBUZZAMAN, M.; VISTRO, R. B. Soilless agricultural systems: opportunities, challenges, and applications for enhancing horticultural resilience to climate change and urbanization. Horticulturae, v. 11, n. 6, p. 568, 2025.

POMONI, D. I.; KOUKOU, M. K.; VRACHOPOULOS, M. G.; VASILIADIS, L. A review of hydroponics and conventional agriculture based on energy and water consumption, environmental impact, and land use. Energies, v. 16, n. 4, p. 1690, 2023.

RAJASEGER, G.; CHAN, K. L.; TAN, K. Y.; RAMASAMY, S.; KHIN, M. C.; AMALADOSS, A.; HARIBHAI, P. K. Hydroponics: current trends in sustainable crop production. Bioinformation, v. 19, n. 9, p. 925, 2023.

RAMSDEN, E. Hall-effect sensors: theory and application. Oxford: Elsevier, 2011.

RESH, H. M. Hydroponic food production: a definitive guidebook for the advanced home gardener and the commercial hydroponic grower. Boca Raton: CRC Press, 2022.

ROSE, K.; ELDRIDGE, S.; CHAPIN, L. et al. The internet of things: an overview. The Internet Society (ISOC), v. 80, n. 15, p. 1–53, 2015.

CÁCERES, C. C.; JUNQUEIRA, L. G. S. S. Sistema de Monitoramento e Atuação Automático para Produção Hidropônica. GitHub. Disponível em: https://github.com/camilacaceres1d/Sistema-de-Monitoramento-e-Atuacao-Automatico-para-Producao-Hidroponica.