

MAXIMIZANDO CULTIVOS SEMI-HIDROPÔNICOS: TOMADA DE DECISÃO COM BASE NA RADIAÇÃO SOLAR

Murilo Dagostin¹, Valter Blauth Junior²

Resumo: A agricultura moderna tem incorporado tecnologias digitais com o objetivo de otimizar o uso de recursos naturais e aumentar a eficiência produtiva. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento ambiental voltado a cultivos semi-hidropônicos, com ênfase na radiação solar como parâmetro para apoio à decisão de irrigação. O sistema foi construído utilizando sensores de temperatura, umidade do ar, umidade do solo e radiação solar, integrados a um microcontrolador ESP32 responsável pela coleta e transmissão dos dados a um servidor em Python, que armazena e disponibiliza as informações em uma interface web. Os testes foram realizados em um cultivo de morangos, onde o sistema operou de forma estável e apresentou medições condizentes com as condições observadas em campo. Os resultados indicaram tendência de correlação negativa entre radiação solar e umidade do solo, sugerindo aumento no consumo hídrico das plantas em dias de maior incidência solar. Entretanto, fatores como a utilização de sensores simples, sujeitos a pequenas oscilações, e a ocorrência de dias com baixa radiação limitaram a precisão e a amplitude das análises. Ainda assim, o sistema demonstrou potencial para auxiliar o produtor no monitoramento ambiental e se mostrou uma alternativa acessível e adaptável para aplicações agrícolas de pequena e média escala.

Palavras-chave: agricultura de precisão; radiação Solar; ESP32; monitoramento ambiental; irrigação; internet das coisas. IOT.

ABSTRACT: Modern agriculture has increasingly adopted digital technologies to optimize natural resource use and improve production efficiency. In this context, this work presents the development of an environmental monitoring system for semi-

¹ Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), murilo.dagostin2@gmail.com

² Orientador. Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), valterblauth@unesc.net

hydroponic crops, emphasizing solar radiation as a parameter to support irrigation decisions. The system was built using temperature, air humidity, soil moisture, and solar radiation sensors integrated into an ESP32 microcontroller, which collects and transmits data to a Python server that stores and displays the information through a web interface. Field tests were conducted in a strawberry crop, where the system operated stably and produced readings consistent with real environmental conditions. The results indicated a negative correlation trend between solar radiation and soil moisture, suggesting increased water consumption by plants on days with higher solar incidence. However, limitations such as the use of low-cost sensors, occasional reading oscillations, and several days of low solar radiation affected the precision and scope of the analysis. Even with these constraints, the system showed potential to assist producers in environmental monitoring and represents an accessible and adaptable solution for small- and medium-scale agricultural applications.

Keywords: precision agriculture; solar radiation; ESP32; environmental monitoring; irrigation; internet of things; IOT.

1 INTRODUÇÃO

A agricultura moderna tem se beneficiado significativamente da integração de tecnologias digitais, que buscam atender à crescente demanda por eficiência produtiva, sustentabilidade e otimização do uso de recursos naturais. Nesse cenário, a agricultura inteligente surge como uma alternativa viável para diversos tipos de cultivo, inclusive para pequenos e médios produtores, ao incorporar sensores ambientais, conectividade sem fio e plataformas digitais de monitoramento em tempo real (Majhool et al., 2021). Em sistemas semi-hidropônicos, largamente utilizados em ambientes controlados como estufas, o sucesso da produção está diretamente relacionado ao controle rigoroso de variáveis ambientais. Entre essas variáveis, a radiação solar desempenha papel fundamental, pois influencia diretamente a fotossíntese e, conseqüentemente, o desenvolvimento e a produtividade das plantas.

No entanto, o excesso de radiação pode causar estresse hídrico e danos às folhas, comprometendo a qualidade do cultivo (Katyal et al., 2022). Assim, é essencial que a gestão da radiação solar seja realizada com base em dados precisos e atualizados constantemente. Apesar disso, muitos produtores ainda dependem de observações visuais ou medições manuais para tomar decisões quanto à irrigação e

proteção das plantas. Essa limitação compromete a eficiência no uso da água, especialmente em contextos de escassez hídrica. A adoção de sensores integrados a microcontroladores, capazes de coletar dados ambientais como temperatura, umidade e radiação solar, e enviá-los a sistemas computacionais via redes sem fio, tem se mostrado uma solução promissora para otimizar o processo produtivo (Kimura et al., 2023). Aliada a essa infraestrutura, a utilização de uma interface web para visualização dos dados em tempo real pode contribuir para decisões mais precisas no campo. Além disso, algoritmos de decisão automatizada baseados nesses dados podem acionar sistemas de irrigação ou notificar o agricultor, reduzindo desperdícios e melhorando o manejo hídrico (Sindhya, 2023).

Dessa forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema para monitoramento ambiental em cultivos semi-hidropônicos, com foco no uso da radiação solar como parâmetro-chave para apoiar decisões relacionadas à irrigação. O objetivo geral é desenvolver um sistema de monitoramento para cultivos semi-hidropônicos, utilizando sensores de radiação solar, umidade e temperatura conectados a um microcontrolador e integrados a uma interface web, com o intuito de auxiliar agricultores na tomada de decisão sobre a irrigação.

Os objetivos específicos consistem em realizar uma revisão bibliográfica sobre o uso de sensores e tecnologias inteligentes em cultivos semi-hidropônicos; projetar e implementar um protótipo funcional com sensores de radiação solar, umidade e temperatura; desenvolver uma interface web para visualização dos dados; criar algoritmos para tomada de decisão automatizada; e validar o sistema em uma plantação de morangos. A escolha do tema se justifica pela necessidade de tornar acessíveis as tecnologias de agricultura de precisão para pequenos e médios produtores, que frequentemente enfrentam barreiras técnicas e financeiras. O desenvolvimento de um sistema de monitoramento com baixo custo, utilizando microcontroladores como o ESP32 e sensores amplamente disponíveis, pode representar uma alternativa viável (Kamarulzaman et al., 2021).

Além disso, a proposta atende à crescente demanda por práticas agrícolas mais sustentáveis e pelo uso racional da água. O controle da radiação solar como fator decisivo na irrigação é pouco explorado em soluções para esse público, o que evidencia uma lacuna que este trabalho pretende suprir. Ao aliar simplicidade, baixo custo e eficiência, este projeto contribui com a inovação no campo.

A semi-hidroponia é uma variação da técnica tradicional de hidroponia, que consiste no cultivo de plantas sem solo, onde todos os nutrientes são fornecidos por uma solução nutritiva (Egidio, 2012). Na maior parte das culturas hidropônicas, são empregados sistemas do tipo NFT (Nutrient Film Technique), que operam com pouco ou nenhum substrato. Essa configuração é amplamente adotada, mas apresenta limitações em regiões com altas temperaturas, como no Sul do Brasil, onde o aquecimento da solução nutritiva se torna um dos principais entraves à produção (Andriolo, 2004). Com o objetivo de contornar esse problema, desenvolveu-se a utilização de substratos, adaptação que passou a ser conhecida como semi-hidroponia. Essa técnica ganhou força especialmente em países mediterrâneos, onde a maior parte dos sistemas comerciais passou a empregar algum tipo de substrato como meio de sustentação e tamponamento térmico (Andriolo, 2004).

Paralelamente, a agricultura de precisão surge como uma abordagem inovadora que utiliza tecnologias avançadas para otimizar a produção, permitindo o monitoramento detalhado das condições do solo, das plantas e do ambiente com o uso de sensores, GPS e outras ferramentas. Com isso, é possível tomar decisões mais precisas, otimizando o uso de recursos e aumentando a produtividade de forma sustentável (Erickson, 2021). A eficiência no uso da água é um dos principais benefícios, e a irrigação de precisão visa atender com exatidão às necessidades hídricas das plantas. Para maximizar seus benefícios, a integração de tecnologias como sensores de solo e clima a sistemas de apoio à decisão torna-se fundamental (Adeyemi et al., 2017). Contudo, a adoção da agricultura de precisão por pequenos produtores enfrenta desafios de custos e complexidade técnica.

Estudos indicam que o investimento elevado e o tamanho reduzido das propriedades são barreiras importantes, sendo essencial desenvolver soluções mais acessíveis, como o uso de sensores de baixo custo e microcontroladores simples (Pandeya et al., 2025). Nesse contexto, a radiação solar é uma das principais fontes de energia que impulsionam os processos fisiológicos das plantas, com destaque para a fotossíntese e a transpiração. No caso do morangueiro, a intensidade da radiação solar está diretamente relacionada ao consumo hídrico, já que regula a energia disponível para a evapotranspiração (Gonçalves et al., 2016). Quando há maior incidência de radiação, a energia disponível é prioritariamente convertida em evapotranspiração, o que aumenta a demanda por irrigação. Essa dinâmica foi observada por Silva Junior (2023), que destacam que, em contextos com alta

disponibilidade hídrica, a maior parte da energia solar é utilizada na perda de água pelas plantas. Compreender essas interações é essencial para o desenvolvimento de estratégias inteligentes de monitoramento, sobretudo em sistemas semi-hidropônicos, onde o fornecimento de água deve ser preciso (Palencia et al., 2013). Ao identificar a radiação solar como variável-chave, é possível construir modelos mais sensíveis às flutuações climáticas e promover um manejo hídrico mais eficiente.

A análise de trabalhos correlatos é fundamental para posicionar a presente pesquisa no cenário científico atual. O estudo de Medrano et al. (2022) propõe um modelo simplificado baseado na equação de Penman-Monteith para otimizar a irrigação em cultivos de morango, utilizando dados de radiação solar e déficit de pressão de vapor. Embora preciso, o modelo envolve cálculos complexos e requer sensores avançados, o que pode limitar sua adoção. O presente trabalho diferencia-se ao propor uma solução mais acessível, com sensores simples e lógica embarcada. Já Maya et al. (2023) exploram a aplicação da lógica fuzzy no controle da irrigação, considerando múltiplas variáveis como temperatura, umidade e pH. O sistema demonstrou ganhos de eficiência, mas sua estrutura exige conhecimento técnico especializado e maior investimento.

Em contraste, a solução aqui proposta adota uma abordagem mais pragmática, baseando a decisão em faixas de valores de radiação e umidade, tornando-a mais viável para agricultores com menor acesso a tecnologias avançadas. Por fim, Kim et al. (2024) analisam o uso de células de carga para medir diretamente a evapotranspiração, permitindo um controle preciso da irrigação. Contudo, a necessidade de equipamentos caros e sensíveis representa um desafio para sua replicação. Este trabalho se diferencia ao adotar sensores de baixo custo e amplamente disponíveis, como LDRs e sensores resistivos, oferecendo uma alternativa mais econômica e com foco em escalabilidade para ambientes protegidos.

De acordo com os estudos realizados, encontram-se poucas aplicações que sejam, ao mesmo tempo, de baixo custo e focadas no uso da radiação solar para otimizar a irrigação, principalmente para pequenos e médios produtores. Portanto, esta pesquisa tem por objetivo aplicar a utilização das tecnologias citadas na integração de sensores com uma interface web para servir como auxílio na irrigação em cultivos semi-hidropônicos de morango.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e caráter exploratório-descritivo, pois busca tanto entender quanto propor uma solução tecnológica para um problema prático no contexto agrícola. O método utilizado é experimental, com a construção e validação de um protótipo funcional em ambiente real de cultivo.

Para a construção de um sistema de monitoramento, são necessários componentes eletrônicos, que são peças responsáveis por funções específicas em um circuito. A eletrônica moderna, impulsionada por avanços históricos e pelo desenvolvimento de semicondutores, permitiu a criação de dispositivos de baixo custo e alta eficiência, essenciais para projetos de automação (Santos, 2019).

No centro do protótipo proposto está o microcontrolador ESP32, lançado em 2016 pela Espressif Systems. Ele se consolidou no mercado por seu alto desempenho, design compacto e, crucialmente, por sua conectividade Wi-Fi e Bluetooth integrada, características que o tornam ideal para projetos de Internet das Coisas (IoT) (NETO, 2021). Suas especificações, como maior número de portas de entrada/saída e processamento mais rápido, oferecem vantagens significativas sobre outras placas do mercado (Martins, 2019).

Para a coleta de dados ambientais, foram selecionados sensores específicos. O DHT11 foi escolhido para medir temperatura e umidade, sendo uma solução confiável que integra um sensor de umidade resistivo e um termistor NTC. Sua arquitetura garante boa precisão, resposta rápida e simplicidade de integração, sendo tecnicamente adequado e economicamente viável para aplicações agrícolas (Mouser Electronics, 2020).

Para medir a radiação solar, foi escolhido o sensor LDR, um componente cuja resistência elétrica varia conforme a intensidade da luz. No escuro, sua resistência é alta, enquanto na presença de luz, ela diminui drasticamente, permitindo uma medição indireta da luminosidade (Alencar, 2016). Estudos mostram que sensores LDR podem ser uma alternativa econômica aos piranômetros tradicionais para medir a radiação solar global em aplicações que não exigem precisão extrema (Vieira, 2015). Por fim, para aferir a umidade no substrato, foi empregado um sensor de umidade do solo resistivo. Ele opera medindo a resistência elétrica entre dois eletrodos: quanto mais úmido o solo, menor a resistência. Apesar de suscetíveis a

fatores como salinidade e corrosão (Saleh et al., 2016) seu baixo custo e facilidade de uso os tornam uma opção viável para aplicações que priorizam a acessibilidade (Carvalho, 2016).

A coleta de dados foi feita por meio da instrumentação de uma plantação de morangos com sensores específicos: um sensor de Luminosidade do tipo LDR, um sensor DHT11 para aferição de temperatura e umidade do ar, e um sensor capacitivo de umidade do solo. Esses sensores são conectados a um microcontrolador ESP32, que realiza a leitura periódica dos dados e os envia, via rede Wi-Fi, a um servidor desenvolvido com a linguagem Python, utilizando o framework Flask.

O servidor armazena os dados em um banco de dados relacional SQLite, permitindo consultas posteriores e a construção de gráficos históricos. A visualização foi idealizada por meio de uma interface web responsiva, acessível em tempo real. Esta interface exibe os dados coletados em formato numérico e gráfico, além de alertas relacionados a limites críticos previamente definidos.

Para todas as linguagens de programação envolvendo WEB e Python, foi utilizada a IDE Visual Studio Code (1.104.3)

2.1 DESENVOLVIMENTO SERVIDOR

Para o servidor implementou-se uma arquitetura RESTful, utilizando-se do framework Flask, da linguagem de programação Python, e com três endpoints principais. O endpoint /dados, configurado para aceitar requisições POST, funciona como portal de entrada dos dados coletados pelo ESP32. O microcontrolador envia uma requisição HTTP POST, o servidor extrai os valores. Os valores são inseridos no banco de dados SQLite por meio de uma query parametrizada. Para as consultas e inserções de dados no Banco de Dados, foi utilizada a biblioteca SQLite3.

O endpoint /api/data foi construído como interface de consulta, implementando o padrão GET REST para recuperação de dados, executa múltiplas operações SQL: primeiro recupera os parâmetros configurados da tabela “parameters”, depois busca as últimas 180 leituras ordenadas por ID descendente, e por fim processa esses dados para determinar o status de cada sensor.

O endpoint /api/parameters implementa um padrão dual GET/POST, permitindo tanto recuperação quanto atualização dos parâmetros de monitoramento. Na operação GET, retorna os oito valores de limites (mínimo e máximo para cada um

dos quatro sensores). Na operação POST, recebe um objeto JSON, extrai os novos valores e executa um UPDATE na tabela parameters.

O banco de dados SQLite foi estruturado com duas tabelas. A tabela “readings”, composta pelos campos ID, timestamp, temperature, humidity, soil-moisture, solar_radiation, que armazena as leituras dos sensores, e a tabela “parameters”, que armazena os parâmetros máximos e mínimos escolhidos pelos usuários, para cada variável.

2.2 DESENVOLVIMENTO DASHBOARD WEB

A interface web foi construída na linguagem HTML, CSS e Javascript, e utilizada a biblioteca Chart.js para construir o gráfico em tempo real. Ela funciona com um mecanismo de polling da Fetch API. É executada a cada 60 segundos para atualização dos dados, disparando primeiro o comando `fetch('/api/data')` inicia a requisição HTTP, processa a resposta e converte o JSON, e o por último, distribui os dados recebidos para diferentes componentes da interface.

Foi implementado um *card* para cada variável ambiental, e um status é apresentado abaixo do valor atual, informando se o valor está bom, baixo, ou alto, de acordo com os valores cadastrados nos parâmetros.

2.3 MONTAGEM DO HARDWARE/SOFTWARE DO ESP32

O microcontrolador ESP32 utilizado foi o NodeMCU-32S (Figura 1), e a interface ARDUINO IDE V2.3.6, para implementar um cliente HTTP utilizando a biblioteca HTTPClient nativa do framework Arduino-ESP32. A cada 60 segundos, o ESP32 coleta dados dos sensores. Os valores do ADC (0-4095) são convertidos para unidades físicas utilizando-se de mapeamento linear (função MAP) para umidade do solo. A leitura de temperatura e umidade do ar, foi realizada utilizando a biblioteca ‘*Adafruit Unified Sensor*’.

A requisição HTTP foi construída usando a biblioteca *Esp Async Webserver*, com formato form-urlencoded, concatenando os pares chave-valor em uma string. Em caso de falha de conexão WiFi, o sistema tenta reconexão automática, garantindo resiliência contra instabilidades de rede. O código de resposta HTTP é verificado, com log detalhado no monitor serial para debugging, incluindo valores raw do ADC, tensões calculadas e valores finais convertidos, facilitando calibração e manutenção do sistema.

A conexão do microcontrolador a rede wifi foi realizada utilizando a biblioteca nativa da IDE Arduino, Wifi.h.

Figura 1 - ESP32 NodeMCU-32S



Fonte: Autocore Robótica (2025)³

2.4 SENSORES

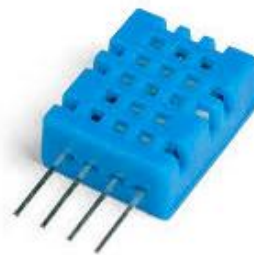
Os sensores foram alimentados com a saída 3.3V presente no microcontrolador e utilizados os pinos 4 e 34, para o sensor DHT11 e o sensor de umidade do solo, respectivamente. O sensor de umidade e temperatura do ar utilizado foi o DHT11, (figura 3), e segundo o Datasheet fornecido pela fabricante, Mouser Electronics, o mesmo pode possuir variações entre -1°C até +2 °C.

Figura 2 - Sensor Solo Capacitivo



Fonte: UsinaInfo(2025)⁴

Figura 3 - DHT 11



Fonte: Robo Core (2025)⁵

³<https://www.autocorerobotica.com.br/placa-de-desenvolvimento-wifi-bluetooth-esp32?srsId=AfmBOopxI5XfiyDCinmGK-O7StuNgzLKikuHqJr7cWfHw8ltz9GaBHCx>

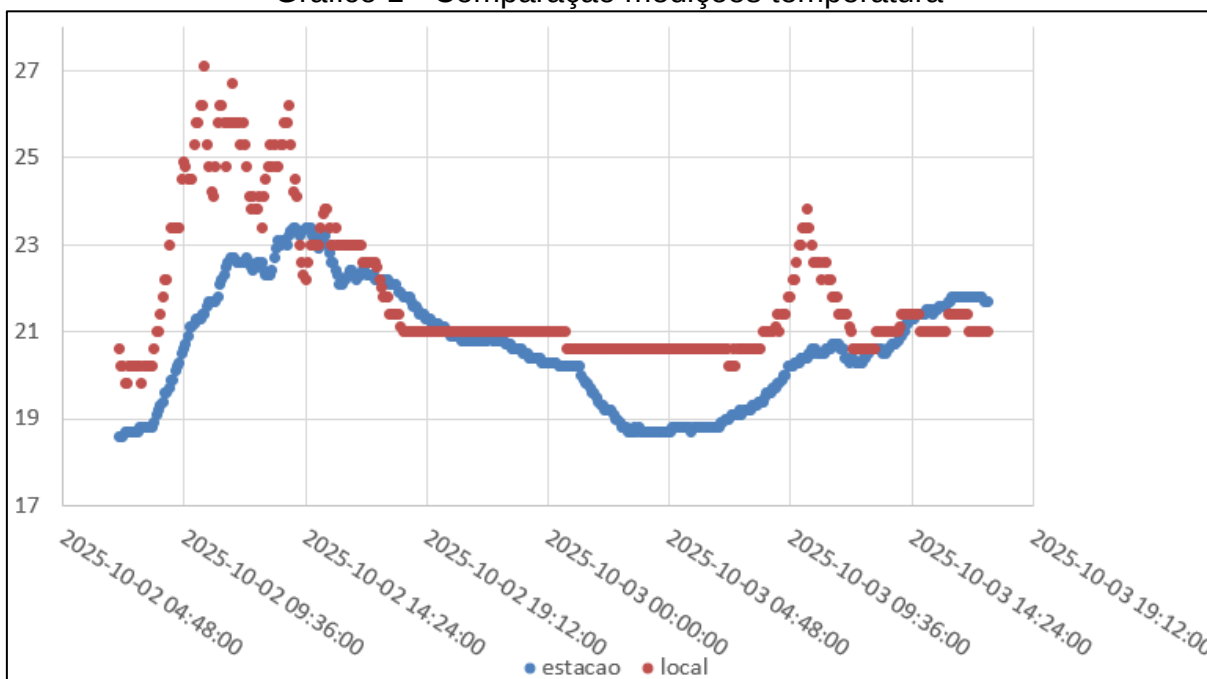
⁴ <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-umidade-arduino/sensor-de-umidade-de-solo-capacitivo-5v-jumper-5134.html?srsId=AfmBOoaa0eOKJIPDmjSVwGnwt1vHmkQ-mQsGNiRe3bo6FvokBLnic23I>.

⁵ https://www.robocore.net/sensor-ambiente/sensor-de-temperatura-dht11?srsId=AfmBOoqpHIO6_azNocD5qcT-UwiNTIpYAj65J1W5JiP2uHUEfQZbVH0.

Para a validação da leitura realizada pelo sistema, foi comparada a medição de temperatura do mesmo - realizada em área aberta, em cobertura do sol - com a estação meteorológica localizada na Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Para tal comparação, foram realizadas 468 medições, em um intervalo de 5 minutos cada, durante o período diurno, nos dias 02 e 03 do mês de outubro de 2025.

As leituras da estação UNESC foram obtidas utilizando a plataforma Weather Underground⁶, que reúne dados em tempo real de estações meteorológicas ao redor do mundo. De acordo com os dados coletados, a temperatura média percebida na leitura da estação UNESC, no período especificado, foi de 20,70 °C. A média obtida nas leituras do sensor DHT11 foi de 21,76 °C. A distância em linha reta entre os dois pontos de medição foi de aproximadamente 15Km. O Gráfico 1 apresenta um comparativo das medições realizadas.

Gráfico 1 - Comparação medições temperatura



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Dentre os motivos pelos quais as leituras se diferenciam, estão a margem de erro da medição do sensor DHT11 anteriormente citada, e principalmente a distância entre os pontos de medição, estação UNESC e a medição realizada.

⁶ <https://www.wunderground.com/>

Para a leitura da umidade do solo, inicialmente foi realizada a montagem com um sensor de umidade do solo resistivo, porém, com 7 dias de teste, foi constatado que o mesmo apresentava oxidação nos contatos metálicos, que servem para a leitura da resistência do solo (Figura 4). O sensor se mostrou bom nos primeiros dias, porém após isso perdeu a eficiência e foi substituído pelo sensor capacitivo. Esse não possui contatos metálicos diretamente com o solo, e se mostrou muito mais durável e confiável para o que foi proposto.

Figura 4 - Sensor resistivo oxidado



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Calibração do sensor capacitivo de umidade do solo foi realizada submergido o sensor em um recipiente com água, para assim capturar a leitura do utilizando-se como o valor base, de 100% de umidade do solo. Em seguida, foi realizada a leitura apenas conectado ao ESP32, mas sem entrar em contato com nenhuma superfície, para obtermos o valor de 0% de umidade. As leituras acima descritas foram, respectivamente, 2900 e 968.

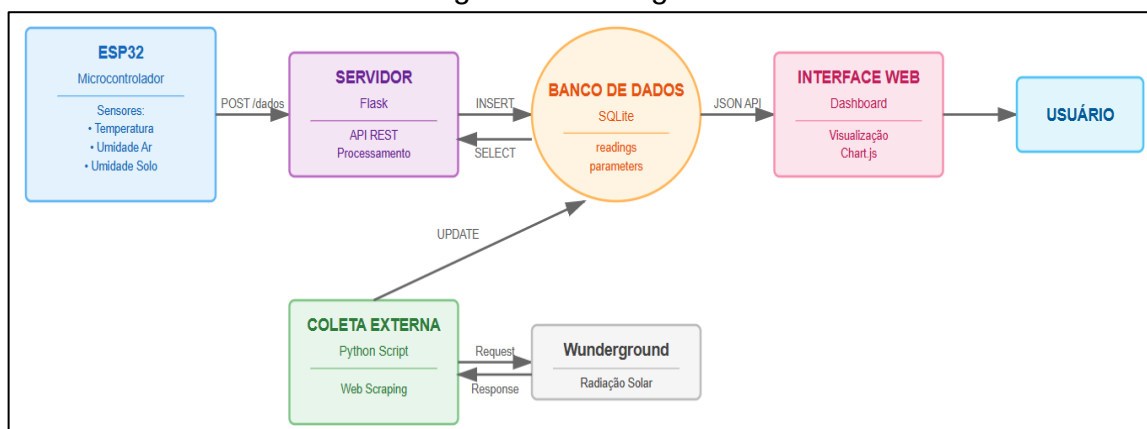
Quanto ao sensor LDR que seria utilizado para a medição de radiação solar, nossos testes inicialmente utilizavam uma fórmula encontrada por Vieira em seu estudo, para estimar a radiação solar com apenas a leitura da queda de tensão e corrente que circulava entre seus polos, entretanto, em nossos testes o sensor se mostrou ineficiente para tal utilização. O sensor referido não tem uma operação linear e, portanto, acabava distorcendo as medições realizadas. Além disso a tensão nos polos acabava saturando facilmente, devido ao baixo custo e simplicidade do sensor, com baixos níveis de luminosidade solar ou até mesmo em dias nublados, por esse

acontecimento, optamos por utilizar a estação meteorológica da UNESCO, anteriormente citada, como fonte dos dados da radiação solar.

2.5 RADIAÇÃO SOLAR

Pelo fato de não ter sido utilizado o sensor LDR para a leitura solar, a coleta dos dados da Estação Meteorológica da UNESCO (ICRICI10) foi realizada pela implementação de um sistema Python de *web scraping* para coleta periódica da radiação solar, na plataforma Weather Underground. Os dados capturados foram armazenados, juntamente com as outras medições no mesmo banco de dados. Podemos observar na Figura 5, o fluxo da coleta, armazenamento, e exibição dos dados executada no trabalho.

Figura 5 - Fluxograma



Fonte: Elaborado pelo Autor.

2.6 INSTALAÇÃO EM CAMPO

As medições foram realizadas no Bairro Linha Zilli, área rural da cidade de Içara/SC, onde fica situada a empresa Budni Hortifruti. O Servidor Flask foi executado diretamente na IDE Visual Studio Code (1.104.3), em uma máquina em rede local. O período total da coleta foi de 33 dias iniciando no dia 06/10/2025 até 07/11/2025.

O Hardware responsável pela coleta de dados foi montado em uma caixa hermética, própria para instalações elétricas, que é vantajosa por possuir vedação contra a água. Todo o conjunto foi instalado em um canteiro de morangos, ficando abaixo do plástico e protegido de qualquer tipo de chuva ou umidade que pudesse afetá-lo.

O sensor DHT11 foi acoplado em frente a caixa, e uma espécie de parasol foi improvisado com papel cartão, para evitar o contato direto do sol com o sensor afetando assim sua medição. O sensor de umidade do solo, foi isolado com fita para evitar a possível ação da umidade, já que está localizado no solo, e foi inserido no solo até a marcação indicada no mesmo.

Figura 6 - Sistema em campo



Fonte: Elaborado pelo Autor.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram organizados em duas partes complementares: a primeira apresenta o desempenho do sistema desenvolvido, enquanto a segunda analisa os dados ambientais coletados e a relação entre radiação solar e umidade do solo.

3.1 DESEMPENHO DO SISTEMA

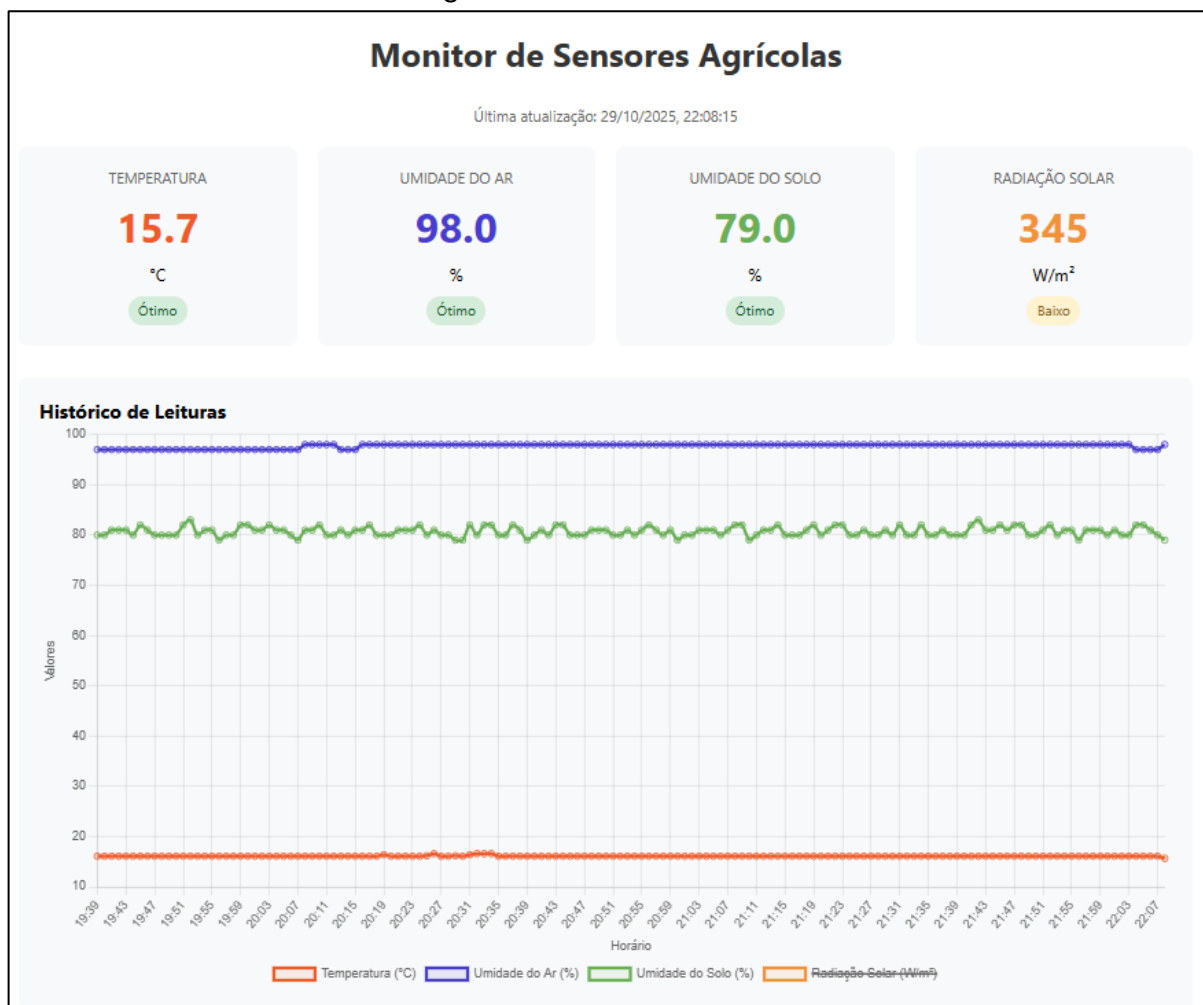
Durante os testes de campo, o sistema demonstrou funcionamento estável e desempenho satisfatório na coleta e apresentação das informações ambientais. As leituras foram realizadas a cada sessenta segundos, de forma contínua, e transmitidas ao servidor. Em todo o período de operação, observou-se que

o envio dos dados ocorreu de maneira consistente, sem perdas significativas ou interrupções. O intervalo de tempo entre coleta e apresentação dos dados coletados pelo microcontrolador, na interface web, foi de menos de um minuto, o intervalo não era sincronizado entre exibição e coleta, entretanto foi o suficiente para garantir ao produtor o acompanhamento praticamente em tempo real das condições do cultivo.

Durante os testes, ocorreram duas quedas de energia, que ocasionaram o travamento e o desligamento total do sistema, exigindo reinicialização manual do servidor e do microcontrolador. Os dados já coletados permaneceram intactos e a coleta foi restaurada após reinício tanto do servidor quanto do microcontrolador.

A interface web (Figura 7) mostrou-se eficiente na visualização das informações, permitindo o monitoramento simultâneo das variáveis de radiação solar, temperatura, umidade do ar e umidade do solo. A atualização automática dos gráficos e indicadores numéricos possibilitou uma leitura clara das variações ao longo do tempo, sem necessidade de recarregar a página.

Figura 7 - Dashboard WEB



Fonte: Elaborado pelo Autor.

As cores e indicadores visuais utilizados facilitaram a identificação imediata de situações fora dos limites considerados ideais, auxiliando o usuário a compreender o comportamento do ambiente e a tomar decisões mais assertivas sobre a irrigação.

De forma geral, o sistema se mostrou eficiente em cumprir sua principal finalidade: disponibilizar, de maneira simples e acessível, dados ambientais relevantes para o manejo hídrico em cultivos semi-hidropônicos. A coleta automática e a visualização em tempo real representam um avanço significativo em relação ao monitoramento manual, permitindo ao produtor acompanhar o comportamento do ambiente de cultivo com maior precisão e reduzir o risco de irrigação excessiva ou deficiente.

3.2 DADOS AMBIENTAIS

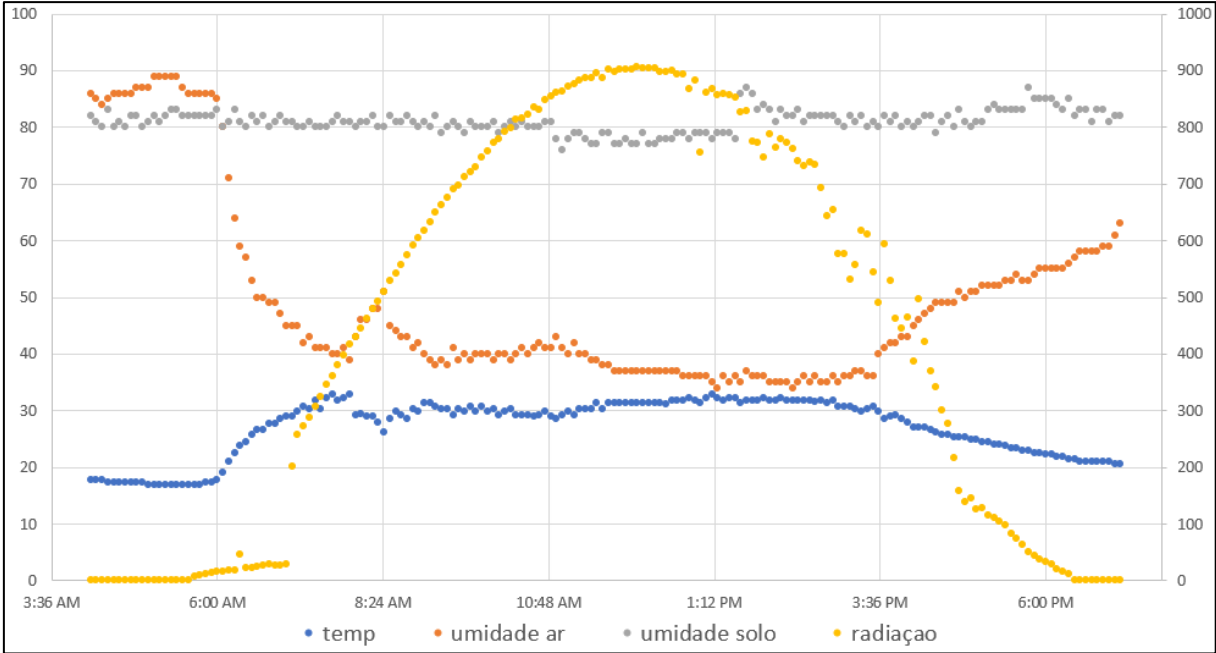
A leitura do sensor capacitivo de umidade do solo apresentou resultados satisfatórios, demonstrando boa sensibilidade às variações de umidade do substrato. No entanto, observou-se certa oscilação nos valores registrados ao longo do tempo. Essa variação está associada tanto a pequenas interferências inerentes ao próprio sensor quanto ao comportamento do conversor analógico-digital (ADC) do ESP32. De acordo com a própria fabricante do microcontrolador, é comum a ocorrência de flutuações nas leituras do ADC, especialmente quando o módulo opera simultaneamente com a comunicação Wi-Fi, sendo assim desaconselhada sua utilização em projetos que necessitem de precisão elevada.

A fim de obter dados mais assertivos sobre a importância do estudo, foi realizada uma análise mais profunda em alguns dias, da correlação linear simples entre radiação solar e umidade do solo. Foram utilizados intervalos de tempo diferenciados para cada dia estudado. Os intervalos foram escolhidos de modo que fosse evitada a interferência da irrigação na comparação dos dados, visto que após a irrigação existe uma ligeira queda na umidade do solo, ocasionada tanto pela absorção da água pelo substrato quanto pela perda por gotejamento do mesmo.

Analisando o Gráfico 2, de 24/10/2025, se observa o aumento da temperatura do canteiro monitorado assim que iniciam os primeiros níveis de radiação solar, por volta das 6h da manhã, e consequente queda da umidade relativa do ar, causando assim uma maior transpiração das plantas e consumo de água. O

comportamento citado anteriormente foi observado em todos os dias monitorados, principalmente nos dias que tiveram maiores incidências de raios solares.

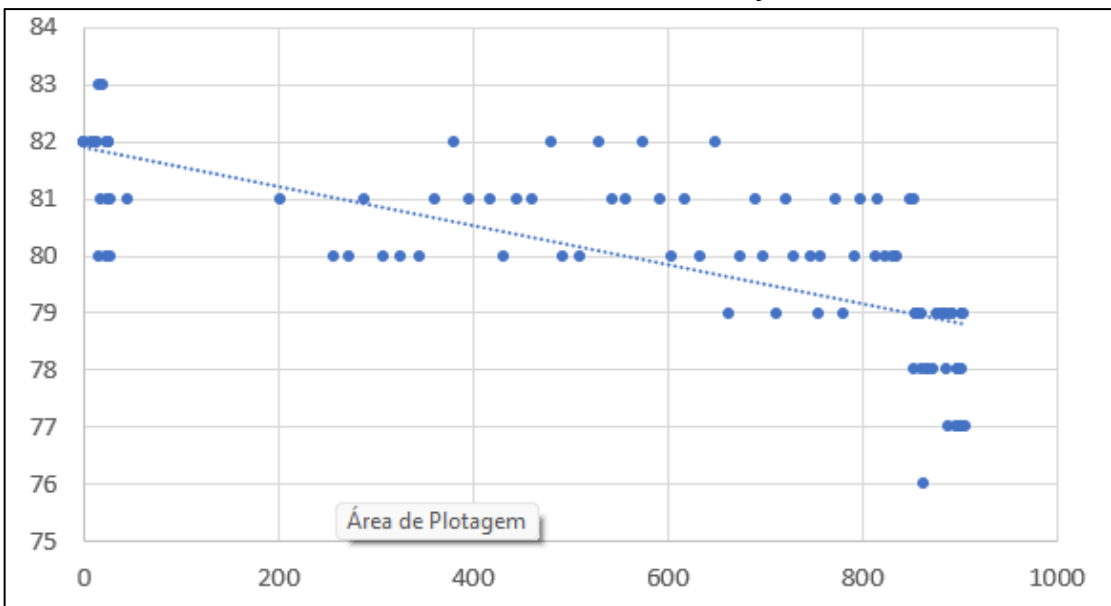
Gráfico 2 - Dispersão das 4 variáveis monitoradas



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Acompanhando a umidade do solo, observou-se que ela vinha em tímida queda durante o dia, quando próximo das 13h ocorre uma elevação, de aproximadamente 10%, na umidade relativa do solo. Isso nos mostra o momento exato em que foi realizada uma irrigação no cultivo e confirma assim o funcionamento tanto do sensor, quanto de todo o sistema.

Gráfico 3 - Umidade do Solo x Radiação Solar



Fonte: Elaborado pelo Autor.

Na dispersão (Gráfico 3) é evidenciada uma certa correlação entre as variáveis, com a linha de Tendência inclinada para baixo, indicando uma correlação negativa entre as variáveis, ou seja, quanto maior a radiação solar menor a umidade do solo. O valor da correlação calculado no exemplo, utilizando dados de 97 medições, foi de -0,7159 o que nos indica uma correlação forte negativa entre as variáveis.

Os valores de correlação (Tabela 1) foram calculados usando dados de 5 dias, utilizando o mesmo método. As médias de radiação solar e temperatura foram calculadas no período das 4h às 19h. A média da temperatura utilizada foi a coletada pelo sistema em campo. Observou-se que nos dias apresentados, quanto maiores as médias de radiação solar, vemos o aumento significativo da correlação entre as variáveis, mesmo em dias com médias de temperaturas menores, e, portanto, evidenciando a relação entre as variáveis estudadas.

Tabela 1 - Correlação entre umidade do solo e radiação solar

Dias	Correlação	Média Rád. dia	Média Umid. Solo	n	Média Temp.
09/10/2025	-0,2363	218,73	79,26%	114	21,79°
13/10/2025	-0,3683	358,11	82,19%	91	28,22°
22/10/2025	-0,5162	452,27	80,70%	78	25,70°
24/10/2025	-0,7159	442,90	80,96%	97	27,07°
25/10/2025	-0,4494	325,44	82,22%	77	27,32°

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Ao comparar os resultados obtidos com os trabalhos apresentados na revisão bibliográfica, observa-se que o sistema desenvolvido neste estudo alcançou desempenho satisfatório na coleta e apresentação das variáveis ambientais, corroborando a importância do monitoramento automatizado no manejo hídrico. O comportamento identificado entre a radiação solar e a umidade do solo segue a mesma tendência relatada por Medrano et al. (2022) que observou que o aumento da radiação provoca elevação na evapotranspiração e consequente redução da umidade disponível para as plantas. No entanto, o modelo proposto por esses autores baseia-se em cálculos complexos e na utilização de sensores de alta precisão, o que limita sua adoção por pequenos produtores. Neste trabalho, resultados semelhantes foram obtidos por meio de sensores simples e de baixo custo, demonstrando que é possível atingir um nível de monitoramento eficaz sem a necessidade de equipamentos sofisticados.

De forma semelhante, Maya et al. (2023) aplicou técnicas de lógica *fuzzy* para controlar a irrigação com base em múltiplos parâmetros ambientais. Apesar de o sistema ter apresentado bons resultados, sua implementação exige maior conhecimento técnico e investimento em hardware e software específicos. Em contraste, o sistema desenvolvido nesta pesquisa adota uma estrutura simplificada, baseada em limites de valores e tomada de decisão direta pelo usuário, o que torna sua aplicação mais acessível e adaptável a diferentes realidades de cultivo.

Por outro lado, Kim et al. (2024) propôs o uso de células de carga para estimar a evapotranspiração e controlar a irrigação com alta precisão, mas os resultados dependem de sensores sensíveis e de difícil manutenção. O protótipo aqui apresentado, embora menos preciso, mostrou-se robusto em ambiente real e eficiente na atualização dos dados em tempo real, características que favorecem sua adoção prática no campo.

O fato de não ter sido possível realizar a medição da radiação solar no local do estudo, com o sensor de luminosidade, pode ser considerada uma limitação do trabalho, pois a radiação solar, devido a distância entre os locais, pôde apresentar variações.

4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que o sistema desenvolvido cumpriu os objetivos propostos, apresentando funcionamento estável e desempenho satisfatório durante os testes em campo. A coleta e transmissão das informações ocorreram de forma contínua e confiável, possibilitando o acompanhamento em tempo real das variáveis ambientais e fornecendo ao produtor uma visão clara das condições do cultivo.

A análise dos dados ambientais confirmou a hipótese de que a radiação solar exerce influência direta sobre a umidade do solo, indicando aumento no consumo hídrico das plantas nos períodos de maior incidência solar. Também foi possível observar que, quanto maior a média diária de radiação, mais evidente se tornava a correlação negativa entre as variáveis, validando a proposta de utilizar a radiação como parâmetro de apoio à tomada de decisão sobre a irrigação.

Apesar dos resultados satisfatórios, o trabalho apresentou algumas limitações. O uso de sensores simples e de baixo custo implicou menor precisão nas medições, especialmente nas leituras de umidade do solo, que apresentaram

oscilações. Além disso, as condições climáticas durante o período de testes, marcadas por vários dias de baixa radiação, reduziram a quantidade de medições em situações ideais, limitando a amplitude da análise. Ainda assim, o sistema demonstrou coerência e confiabilidade dentro do propósito estabelecido.

O projeto diferencia-se por oferecer uma solução acessível e funcional, capaz de fornecer dados relevantes para o manejo hídrico em cultivos semi-hidropônicos, especialmente voltada a pequenos e médios produtores. A interface web mostrou-se eficiente na apresentação das informações e contribuiu para decisões mais assertivas quanto à irrigação, consolidando a viabilidade prática do sistema em campo.¹

Para trabalhos futuros, recomenda-se a utilização de um sensor de radiação solar (piranômetro) local, aumentando assim a precisão do estudo, a integração do sistema a mecanismos automáticos de irrigação e a ampliação do monitoramento para outras variáveis, como pH e condutividade elétrica. Também se sugere a aplicação de modelos de inteligência artificial para tornar o sistema progressivamente inteligente e permitir tomada de decisão automatizada em diferentes cenários de produção agrícola.

REFERÊNCIAS

ADEYEMI, O.; GROVE, I.; PEETS, S.; NORTON, T. **Advanced monitoring and management systems for improving sustainability in precision irrigation.** Sustainability, Basel, v. 9, n. 3, p. 1-21, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su9030353>. Acesso em: 20 nov. 2025

ALENCAR, Kaito. **Sistemas de controle de luminosidade autônoma de um laboratório.** 2016.

ANDRIOLO, J. L., Luz, G. L. da., Giralardi, C., Godoi, R. dos S., & Barros, G. T. (2004). **Cultivo hidropônico da alface empregando substratos: uma alternativa a NFT?** Horticultura Brasileira, 22(4), 794–798. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-05362004000400026>. Acesso em: 20 nov. 2025.

ARDUINO. **Arduino – Programming C++.** 2024. Disponível em: <https://docs.arduino.cc/programming/>. Acesso em: 1 maio 2025.

CARVALHO, MATHEUS SOUZA DE. **Sensor Para Monitoramento De Umidade Do Solo Utilizando Energia Solar,** 2016. Disponível em: <https://www.quixada.ufc.br/wp-content/uploads/2017/03/2016-1-ES-MATHEUS-SOUZA-DE-CARVALHO.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

CHART.JS. **Chart.js documentation**. 2025. Disponível em: <https://www.chartjs.org/docs/latest/>. Acesso em: 01 maio 2025.

ERICKSON, B.; FAUSTI, S. W. (2021). **The role of precision agriculture in food security**. *Agronomy Journal*. 113: 4455–4462.

Disponível em: <https://doi.org/10.1002/agj2.20919>. Acesso em: 05 maio 2025.

EGÍDIO, Neto Bezerra; LEVY, Barreto Paes. **As técnicas de hidroponia**. Academia Pernambucana de Ciência Agronômica, 15 set. 2013. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/228884069.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2025.

PANDEYA, S.; GYAWALI, B. R.; UPADHAYA, S. **Factors influencing precision agriculture technology adoption among small-scale farmers in Kentucky and their implications for policy and practice**. *Agriculture*, Basel, v. 15, n. 2, p. 177, 2025. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture15020177>. Acesso em: 16 maio 2025.

GONÇALVES, Michél Aldrighi; VIGNOLO, Gerson Kleinick; ANTUNES, Luis Eduardo Corrêa; REISSER JUNIOR, Carlos. **Produção de morango fora do solo**. Pelotas, RS: Embrapa Clima Temperado, 2016. 80 p. (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 410).

KAMARULZAMAN, Muhammad Syahmi et al. **Monitoring System of Hydroponic Using Solar Energy**. *Journal of Electronic Voltage and Application*, v. 2, n. 1, p. 26-37, 2021.

KATYAL, Garvit et al. **IoT Based Dual Axis Solar Tracker and Irradiation Forecasting Using Machine Learning**, 2022 10th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions)(ICRITO). IEEE, 2022. p. 1-6.

Kim, K. H., Kim, M., Rabbani, M. G., Lee, Y. B., & Choi, K. Y. **Analysis of Evapotranspiration using a Load Cell and Precise Irrigation Amounts for Strawberries in a Coir Slab Hydroponic System**. *원예과학기술지*, v. 42, n. 5, p. 615-627, 2024.

KIMURA, Hideaki; SUGIYAMA, Tomoya; KIKUZAWA, Momona. **A Self-Contained IoT Sensor Module for Realizing Drastic Cost Reduction**, 2023 International Workshop on Fiber Optics on Access Networks (FOAN). IEEE, 2023. p. 1-3.

MAJHOOL, Mohammed Hassan; ALRIKABI, Haider TH Salim; FARHAN, Mansour S. **Design and implementation of sunlight tracking based on the Internet of Things**. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. IOP Publishing, 2021. p. 01.

MARTINS, Victor Ferreira. **Automação residencial usando protocolo MQTT, Node-RED e Mosquitto Broker com ESP32 e ESP8266**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Controle e Automação) – Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2019. Disponível em:

<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/28522/1/AutomacaoResidencialProtocolo.pdf>. Acesso em: 12 maio 2025.

Maya Olalla, E., Lopez Flores, A., Zambrano, M., Domínguez Limaico, M., Diaz Iza, H., & Vasquez Ayala, C. **Fuzzy control application to an irrigation system of hydroponic crops under greenhouse: case cultivation of strawberries (fragaria vesca)**. Sensors, v. 23, n. 8, p. 4088, 2023.

MDN WEB DOCS. **HTML: Linguagem de Marcação de Hipertexto**, 2024. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/HTML>. Acesso em: 01 maio 2025.

MDN WEB DOCS. **CSS: Cascading Style Sheets**. 2024. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/Web/CSS>. Acesso em: 01 maio 2025.

Medrano, E., Alonso, F. J., Sánchez-Guerrero, M. C., Lorenzo, P., Marhuenda, A., Briones, P. A. **A Simplified PM model for improving irrigation management of strawberries in a semi-closed hydroponic system**. XXVIII International Horticultural Congress on Science and Horticulture for People (IHC2010): International Symposium on 927. 2010. p. 361-366.

MOUSER ELECTRONICS. **DHT11 Temperature & Humidity Sensor – Technical Data Sheet**. [S. l.], 2020. Disponível em: <https://www.mouser.com/datasheet/2/758/DHT11-Technical-Data-Sheet-Translated-Version-1143054.pdf>. Acesso em: 10 maio 2025.

MOZILLA. JavaScript – **Visão geral. MDN Web Docs**, 2024. Disponível em: <https://developer.mozilla.org/pt-BR/docs/conflicting/Web/JavaScript>. Acesso em: 01 maio 2025.

NETO, João Bosco da Costa; COSTA, Pedro Henrique Santiago. **Sistema embarcado de baixo custo utilizando o ESP-32 na telemedicina**. Universidade Potiguar, 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia da Computação) – Escola de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Potiguar, 2023. Disponível em: <https://repositorio-api.animaeducacao.com.br/server/api/core/bitstreams/2ae210c2-3aa5-4b7c-848d-57858c5e7e75/content>. Acesso em: 10 maio 2025.

PALENCIA, Pedro; MARTINEZ, Fatima; MEDINA, M'inguez; JUAN, Lopez; MEDINA, John, 2013. **Strawberry yield efficiency and its correlation with temperature and solar radiation**. Horticultura Brasileira. 31. 93-99. Disponível em: DOI: 10.1590/S010205362013000100015. Acesso em: 30 maio 2025.

SANTOS, Jean Willian; LARA JUNIOR, Renato Capelin de. **Sistema de automação residencial de baixo custo controlado pelo microcontrolador ESP32 e monitorado via smartphone**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

SALEH, Mahdi; Elhajj, Imad H.; Asmar, Daniel; Bashour, Isam. **Experimental evaluation of low-cost resistive soil moisture sensors**. 2016 IEEE International Multidisciplinary Conference on Engineering Technology (IMCET). IEEE, 2016. p. 179-184.

SINDHYA, J. D.; PRIYANKA, R. M. **IOT Integration in Two-Axis Sun Tracking System with LDR Sensors in a Wheatstone Bridge Circuit**. International Journal of Advanced Trends in Engineering and Management, v. 3, n. 10, p. 893-899, 2023. Disponível em: DOI: 10.59544/PKQW9847/NGCESI23P99. Acesso em: 20 jun. 2025.

W3SCHOOLS. **C++ Tutorial. 2024.**

Disponível em: https://www.w3schools.com/cpp/cpp_intro.asp.

Acesso em: 01 maio 2025.

VIEIRA, Romênia Gurgel; UFERSA, Fabiana Karla de O. Martins Varella. **Medição de radiação solar global utilizando sensor LDR**. Revista de Engenharia e Tecnologia, v. 7, n. 1, 2015.