

Sistema automatizado de baixo custo para simulação de estresse hídrico e medição da eficiência do uso da água por plantas em casa de vegetação

Patrick S. Mendes¹, Geyverson Teixeira de Paula², Marcelo Gonçalves Narciso³

¹Instituto de Física - Universidade Federal de Goiás - Goiânia, GO - Brasil

²Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação - Universidade Federal de Goiás - Goiânia, GO - Brasil

³Embrapa Arroz e Feijão - Santo Antônio de Goiás, GO - Brasil

psoaresm23@gmail.com, geyverson@gmail.com, marcelo.narciso@embrapa.br

Abstract. *The selection of drought-tolerant cultivars requires standardized data from controlled experiments, but it is a process compromised by manual collection, unless there is a phenotyping platform for this purpose. To address this bottleneck, this paper presents a low-cost prototype, based on an ESP32 microcontroller, that automates the monitoring of water use efficiency (WUE) and irrigation. The system was validated with cotton plants, demonstrating precise irrigation control and reliable data logging via Wi-Fi to a cloud-based spreadsheet. The results establish the prototype as a tool that increases the rigor and efficiency of agronomic research, aiding the selection of cultivars more resilient to climate change.*

Resumo. *A seleção de cultivares tolerantes à seca exige dados padronizados de experimentos controlados, porém é um processo comprometido pela coleta manual, a não ser que exista uma plataforma de fenotipagem para isto. Para solucionar esse gargalo, este trabalho apresenta um protótipo de baixo custo, baseado em um microcontrolador ESP32, que automatiza o monitoramento da eficiência do uso da água (EUA) e a irrigação. O sistema foi validado com plantas de algodão, demonstrando controle preciso da irrigação e registro de dados confiável via Wi-Fi para uma planilha em nuvem. Os resultados consolidam o protótipo como uma ferramenta que aumenta o rigor e a eficiência da pesquisa agronômica, auxiliando na seleção de cultivares mais resilientes às mudanças climáticas.*

1. Introdução

Garantir a segurança alimentar da população é um dos maiores desafios globais, especialmente em um contexto de mudanças climáticas que já afeta a produção agrícola [Arora 2019]. Otimizar o uso de recursos hídricos tornou-se, assim, uma prioridade da pesquisa agronômica, visando o desenvolvimento de cultivares com maior resiliência a períodos de seca. O êxito dessa busca depende, em grande parte, da capacidade de se conduzir experimentos em ambientes controlados, onde o estresse hídrico pode ser avaliado de maneira rigorosa para uma seleção precisa das sementes [Costa et al. 2023].

Contudo, a metodologia usada na maior parte dos centros de pesquisa utiliza a coleta manual de dados, um processo sujeito a erros humanos e inconsistências que comprometem a padronização e a reproduzibilidade dos experimentos. A falta de um registro de dados preciso e contínuo constitui um gargalo, limitando a profundidade das análises de comportamento das plantas frente ao estresse hídrico.

Para enfrentar esse problema, a agricultura moderna tem se aproximado dos conceitos da Agro 4.0 que utiliza tecnologias digitais, para aumentar a eficiência da produção [Massruhá e Leite 2017]. Nesse prisma, a Internet das Coisas (IoT) surge como uma alternativa eficaz, utilizando sistemas embarcados e redes de sensores para automatizar o monitoramento e o controle de variáveis agronômicas em tempo real [Chamara et al. 2022]. A aplicação de sistemas IoT em ambientes de pesquisa possibilita um controle experimental mais rigoroso e a geração de dados robustos, importantes para o avançar da ciência.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo de baixo custo para automação do monitoramento e da irrigação em experimentos com estresse hídrico, especificamente quanto ao uso eficiente da água pela planta. O objetivo foi o de desenvolver uma ferramenta que organizasse a coleta de dados — tal como a perda de massa de água dos vasos e a umidade do solo — e o manejo da irrigação, tornando-os automáticos em vez de manuais. A solução visava aumentar a eficiência e o rigor da pesquisa, fornecendo um controle preciso das condições experimentais e, consequentemente, auxiliando no desenvolvimento de culturas mais resistentes.

O uso eficiente de água pelas plantas (EUA; do inglês *Water Use Efficiency*, WUE), em casa de vegetação, possibilita a selecionar as melhores variedades de uma cultura para serem validadas no campo. Isso ajuda a diminuir a quantidade de experimentos no campo e também acelera o processo de seleção de cultivares mais apropriados para condições de falta de água (estresse hídrico).

2. Materiais e Métodos

O projeto foi desenvolvido e validado em uma casa de vegetação de um centro de pesquisa agrícola, utilizando-se um experimento com duas plantas de algodão. Um vaso foi definido como "referência", com irrigação controlada para manter um peso constante, enquanto o outro foi mantido sob "estresse", sem receber irrigação automatizada, para se observar a perda contínua de massa de água.

2.1. Arquitetura do Protótipo: Hardware

O protótipo tem como base um microcontrolador ESP32, que é um System-on-a-Chip de baixo consumo integrado com processador dual-core, além de Wi-Fi e Bluetooth, o que é apropriado para aplicações em IoT [Espressif System 2019]. Para coleta dos dados primários, foram utilizadas duas balanças de precisão (Waagen KN P 100/10) , com capacidade de 100kg e precisão de 0,01kg . A interface de comunicação entre as balanças e o microcontrolador foi efetuada por meio de módulos conversores, baseados no chip MAX3232, que realizam a troca de nível de tensão do padrão serial RS232 ao padrão TTL [Dawoud e Dawoud 2022].

Além disso, foram utilizados dois sensores resistivos de umidade no solo (FC-28) para o monitoramento da umidade superficial de cada vaso. Os mesmos forneciam leituras analógicas, sendo processadas pelo conversor Analógico-Digital (ADC) de 12 bits do ESP32. O controle da irrigação automatizada era realizado por meio do acionamento de uma válvula solenoide do tipo latching , que mantém o seu estado (aberta ou fechada)

sem necessidade de alimentação contínua (característica esta que é fundamental para a economia de energia). O acionamento da válvula, que requer inversão de polaridade, era feito por módulo driver da Ponte-H Dupla (L298N). O esquema elétrico do circuito pode ser visualizado no Anexo B.

2.2. Lógica de operação: Software e Firmware

O firmware do protótipo foi elaborado utilizando a linguagem C++ na IDE do Arduino. A lógica de operação foi estruturada em um ciclo otimizado para o menor consumo de energia, conforme o fluxograma apresentado no Anexo A. O processo pode ser desmembrado em três principais etapas:

1. Etapa 1 (Leitura): O microcontrolador deixa o modo de menor consumo (Sleep Mode) e vai para o modo ativo para a leitura das balanças e dos sensores de umidade.
2. Etapa 2 (Comunicação e Ação): O módulo Wi-Fi é ativado para enviar os dados coletados para uma planilha em nuvem. Neste momento, o sistema verifica o peso do vaso de referência e que se ele estiver abaixo do limite pré-definido, a válvula solenoide é acionada para iniciar a irrigação. A irrigação cessa assim que o peso de referência inicial é restabelecido.
3. Etapa 3 (Hibernação): Após o final da transmissão e a ação de irrigação (se houver), o Wi-Fi é desativado e o microcontrolador novamente entra em Sleep Mode, por um período predeterminado, minimizando o consumo de energia até o próximo ciclo de medição.

Os dados eram coletados e armazenados para visualização em uma planilha do Google Planilhas, para a qual eram enviados por requisições HTTP a um script customizado, que estava na plataforma Google Apps Script, que foi programado para recebê-los, acrescentar um timestamp a eles e gravar todos os dados em uma nova linha, a cada requisição, desta planilha do Google Planilhas, desse modo criando um registro cronológico do experimento.

2.3. Procedimento Experimental

A validação do protótipo foi conduzida em duas etapas experimentais, com medições realizadas a cada 12 horas. O primeiro experimento serviu para a calibração geral do sistema e para ajustes no firmware. O segundo, cujos resultados são o foco deste artigo, teve como objetivo validar a funcionalidade completa do monitoramento e da irrigação automatizada. A lógica de irrigação para o vaso de referência foi programada para ser acionada sempre que fosse detectada uma perda de massa de água superior a 0,4 kg.

3. Resultados

3.1. Calibração e Ajustes do Sistema (Experimento 1)

A etapa inicial de testes possibilitou a calibração das balanças e a validação do circuito de controle da irrigação. Mesmo com o peso sendo medido efetivamente, foram encontradas inconsistências nas medições dos sensores de umidade no solo, o que

exigiu ajustes no hardware e no tratamento do sinal pelo firmware. Esta fase foi fundamental para a adequação do protótipo, garantindo a confiabilidade dos dados nos seguintes ensaios de validação.

3.2 Validação Funcional (Experimento 2)

Depois de fazer os ajustes, o segundo experimento confirmou que o sistema estava funcionando completamente. A Figura 1 mostra o desempenho do monitoramento de peso e do controle de irrigação, com dados detalhados disponíveis no Anexo C. Observa-se que o peso do vaso de referência permaneceu em uma média de cerca de 5,8 kg, com os picos ascendentes na curva corroborando as ativações automáticas e precisas do sistema de irrigação. Por outro lado, a curva do vaso sob estresse mostra uma perda de massa consistente, conforme esperado.

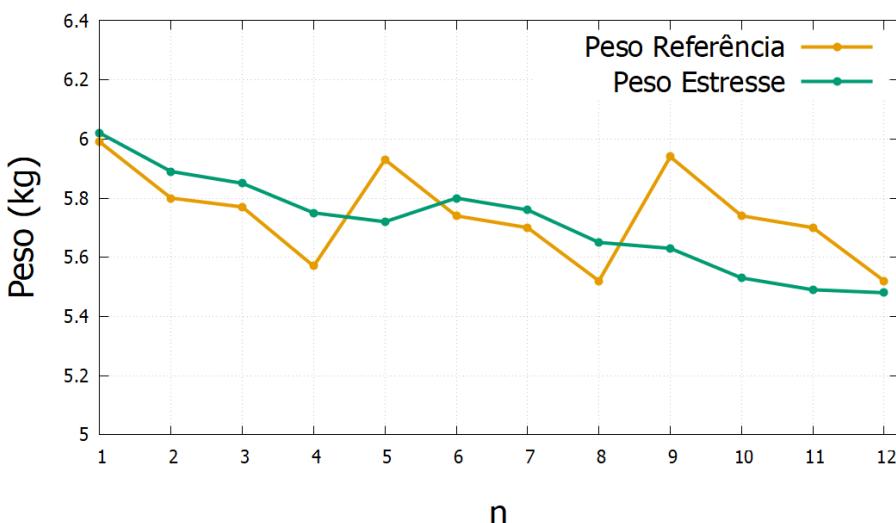


Figura 1. Progressão dos pesos registrados nos vasos de referência e estresse durante o Experimento 2

O monitoramento da umidade superficial do solo, apresentados nas Figuras 2 e 3, complementa a análise. O sistema conseguiu manter a umidade do vaso de referência oscilando em torno de 40% de sua capacidade inicial, enquanto o vaso de estresse apresentou uma diminuição tardia, mas contínua, da umidade.

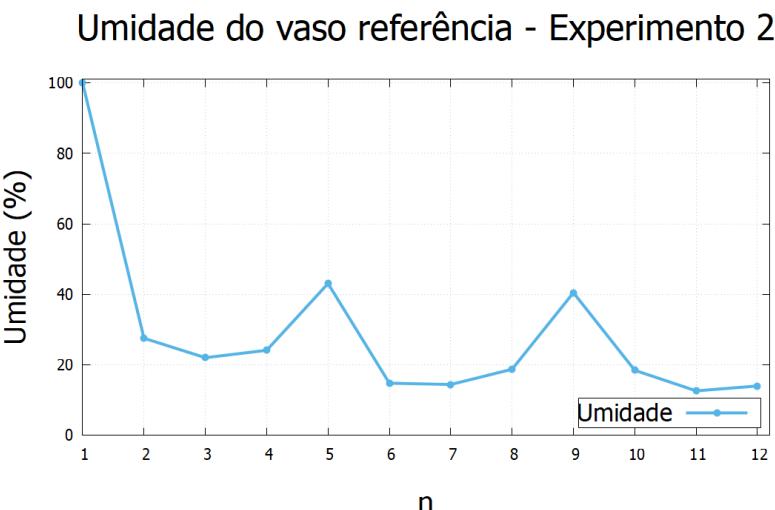


Figura 2. Umidade superficial registrada no vaso de referência.

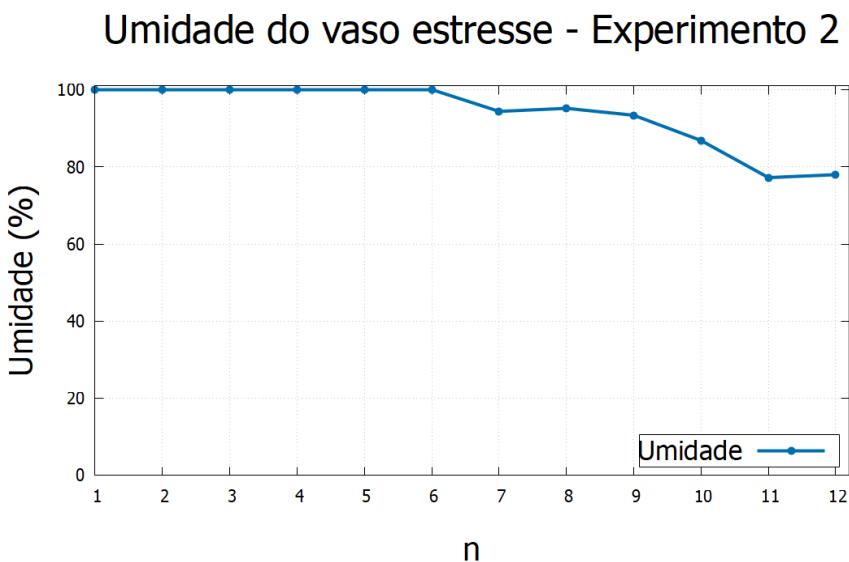


Figura 3. Umidade superficial registrada no vaso em estresse hídrico.

Devido à condições de escassez hídrica já avançadas, visto que os experimentos 1 e 2 foram realizados em sequência, nota-se a adaptabilidade da planta através da constatação da queda de umidade tardia

3.3 Eficiência Energética

Na Tabela 1, é possível observar que, além da validação funcional, a economia de energia também é um relevante resultado do projeto. A abordagem operacional em forma de três etapas constituiu-se como primordial para a viabilidade do sistema

em monitoramentos prolongados. O protótipo teve um consumo de 2,22 W no modo ativo (leitura) e picos de 9,12 W na curta transmissão de dados pelo Wi-Fi. Entretanto, no maior período do ciclo, o sistema permaneceu em modo de consumo baixo (Sleep Mode), consumindo apenas 1,74 W de energia. Tal consumo baixo em Sleep Mode demonstra a eficiência do projeto e sua compatibilidade para aplicações em que a disponibilidade de energia é um fator crítico.

Tabela 1. Consumo de energia do protótipo por etapa de operação

Consumo		
	Tensão 12V	
	Corrente (A)	Potência (W)
Etapa 1	0.185	2.22
Etapa 2	0.760	9.12
Etapa 3	0.145	1.74

4. Discussão

Os resultados em conjunto demonstram o valor do protótipo como uma ferramenta exata para a automação dos experimentos de casas de vegetação com respeito à simulação de estresse hídrico para medir o quanto cada planta gasta para produzir. Ao trocar um processo manual sujeito a erros por um sistema de automação, a solução elaborada atende diretamente à necessidade de padronização e confiabilidade na coleta de dados. O fato de poder registrar continuamente o balanço hídrico das plantas com alta precisão e de forma autônoma é um grande impulso na pesquisa, pois os estudos de seleção de cultivares mais resilientes podem ser feitos com mais precisão e eficiência.

5. Conclusão

Este trabalho teve êxito em desenvolver e validar um protótipo funcional e de baixo custo para a automação de experimentos de estresse hídrico. A solução implementada atendeu diretamente ao desafio da coleta manual de dados, substituindo um processo demorado e propenso a erros por um sistema automatizado que demonstrou fornecer maior precisão, padronização e confiabilidade para os dados coletados, em testes voltados a medir a eficiência do uso da água pelas plantas.

A principal contribuição deste trabalho foi a criação de uma ferramenta que agrupa o rigor metodológico da pesquisa agronômica. A validação experimental demonstrou que o sistema é robusto para o monitoramento das variáveis de interesse e sensível o suficiente para registrar todo o histórico do processo, do início ao fim, registrando até mesmo os eventos não programados, como intervenções manuais. Ao oferecer um fluxo de dados confiável e contínuo, o protótipo torna-se um importante aliado para acelerar e qualificar o processo de seleção de cultivares resistentes às mudanças climáticas.

Como limitação, foi verificada uma leve imprecisão no relógio de tempo real (RTC) do microcontrolador em longos períodos, resultando em pequenos desvios nos

intervalos de medições. Para os experimentos de maior longa duração, seria recomendável a implementação de uma rotina de calibração periódica do relógio pela internet.

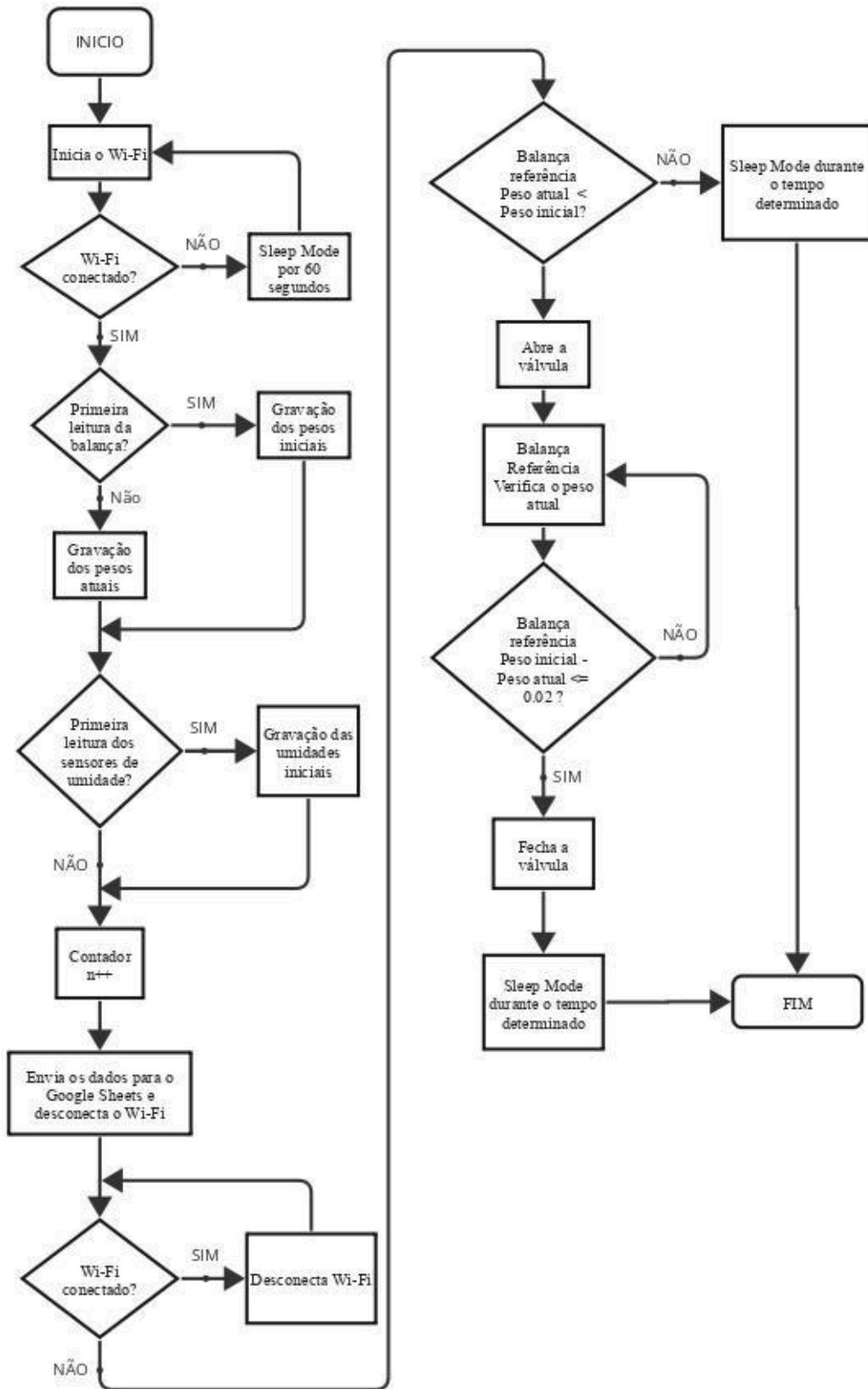
Para trabalhos futuros, o protótipo pode ser melhorado com a inclusão de sensores para outras variáveis ambientais como temperatura e umidade do ar e com a ampliação da sua capacidade para monitoramento de múltiplos vasos simultaneamente. A evolução do sistema, no sentido da incorporação de tais funcionalidades, aumentaria as possibilidades de sua utilização para diferentes cenários de pesquisa em casas de vegetação e, potencialmente, em experimentos de campo.

Referências

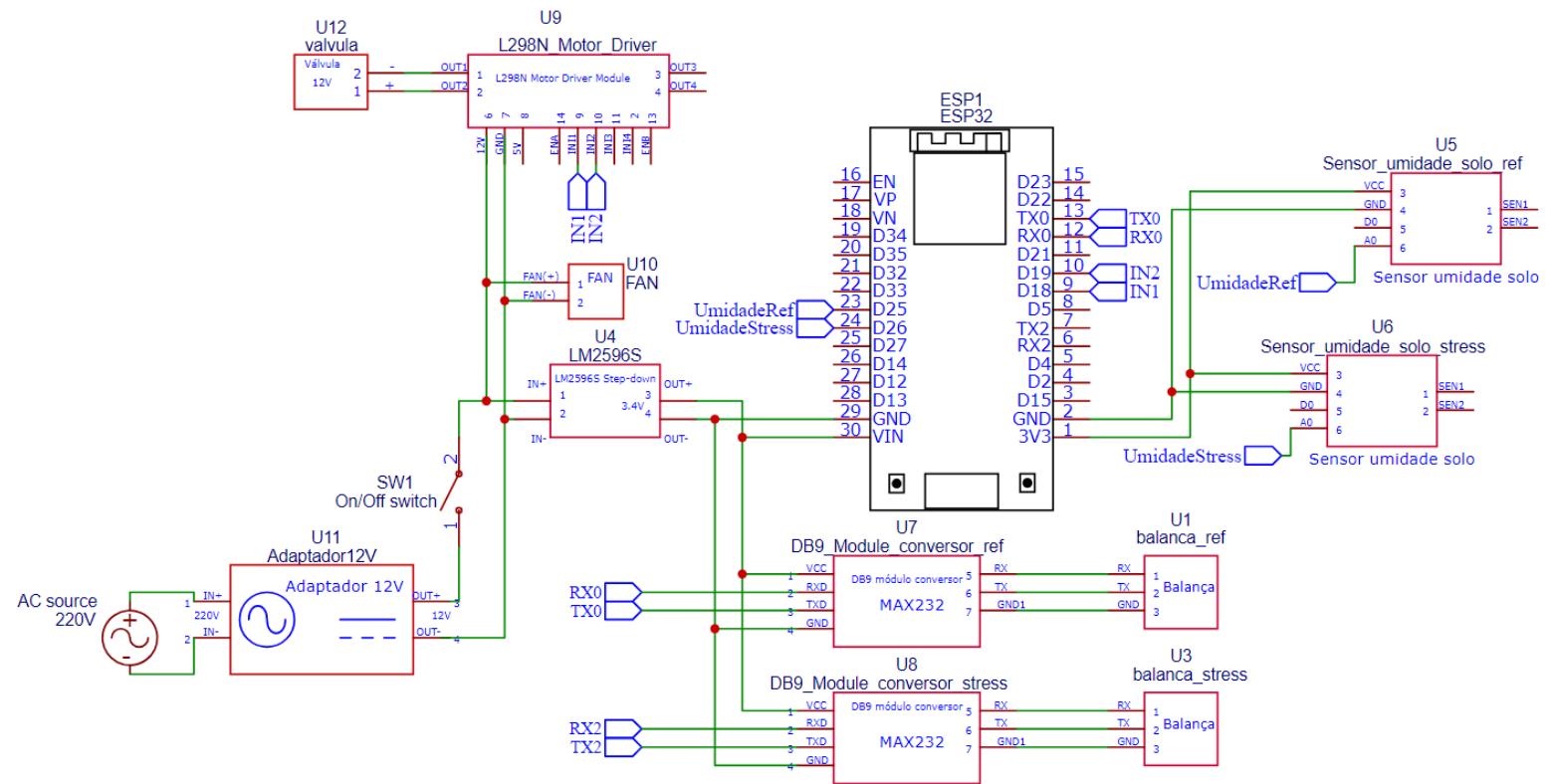
- Assad, E. D. et al. (2020). Efeito das mudanças climáticas na agricultura do cerrado. In: *Dinâmica Agrícola no Cerrado: Análises e Projeções*, p. 213-226. Embrapa.
- Chamara, N. et al. (2022). Ag-iot for crop and environment monitoring: Past, present, and future. *Agricultural systems*, v. 203, p. 103497.
- Costa, N. et al. (2023). Silicon and bioagents pretreatments synergistically improve upland rice performance during water stress. *Plant Stress*, v. 7, p. 100142.
- Dawoud, D. S. and Dawoud, P. (2022). *Serial communication protocols and standards*. CRC Press.
- Espressif System (2019). *ESP32-WROOM-32 Datasheet*. Version 2.9.
- Massruhá, S. and Leite, M. d. A. (2017). Agro 4.0-rumo à agricultura digital. *JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil*, v. 2, p. 28-35.
- Massruhá, S. and Leite, M. d. A. (2017). Agro 4.0-rumo à agricultura digital. *JC na Escola Ciência, Tecnologia e Sociedade: mobilizar o conhecimento para alimentar o Brasil*, v. 2, p. 28-35.
- Oliveira, R. et al. (2025). Smart farming for poultry: Enhancing growth and efficiency with low-cost internet of things solutions. *Computer*, v. 58, p. 106-110.
- Graciano-Neto, V. V. et al. (2022). The state of IoT for agribusiness in Brazil. *Computer*, v. 55, p. 140-144.
- Hanau, C. et al. (2025). Smart farming for poultry: Leveraging chicken raising with low-cost IoT-based information systems. *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI 2025)*, p. 125-134. Porto Alegre: SBC.
- Lopes, V. C. et al. (2021). Towards an IoT-based architecture for monitoring and automated decision-making in an aviary environment. *Anais do XIII Congresso Brasileiro de Agroinformática (SBIAGRO 2021)*, p. 320-328. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação.

ANEXOS

Anexo A - Fluxograma da lógica de operação do protótipo



Anexo B - Esquema Elétrico completo do circuito do protótipo



ANEXO C - Tabela de dados coletados no Experimento 2

n	data	Peso referênci (kg)	Peso estresse (kg)	Água perdida Referênci(kg)	Água Perdida estresse (kg)	Umidade ref (%)	Umidade estresse (%)
1	09/08/2023 9:38:23	5.99	6.02	0	0	100	100
2	09/08/2023 21:40:48	5.80	5.89	0.19	0.13	27.54	100
3	10/08/2023 9:32:46	5.77	5.85	0.22	0.17	22.03	100
4	10/08/2023 21:35:08	5.57	5.75	0.42	0.27	24.13	100
5	11/08/2023 9:27:17	5.93	5.72	0.06	0.3	43.07	100
6	11/08/2023 21:29:09	5.74	5.80	0.25	0.22	14.79	100
7	12/08/2023 9:20:48	5.70	5.76	0.29	0.26	14.42	94.42
8	12/08/2023 21:21:46	5.52	5.65	0.47	0.37	18.75	95.21
9	13/08/2023 09:13:24	5.94	5.63	0.05	0.39	40.47	93.41
10	13/08/2023 21:17:47	5.74	5.53	0.25	0.49	18.44	86.86
11	14/08/2023 09:09:12	5.70	5.49	0.29	0.53	12.62	77.24
12	14/08/2023 21:10:54	5.52	5.48	0.47	0.54	14.00	78.00