DESENVOLVIMENTO DE ESTUFA INTELIGENTE COM IRRIGAÇÃO E APOIO AO CONTROLE DE PRAGAS ALIMENTADA POR ENERGIA SOLAR

Kauê Felipe da Cunha Silva[1], Maria Eduarda Magalhães Landim[1], Thalita de Oliveira Maia[1], Bruno Michel Pera[1], Hélio Lourenço Esperidião Ferreira[1].

[1]Fundação Valeparaibana de Ensino/Colégio Técnico Antônio Teixeira Fernandes, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, kauef748@gmail.com, maria.mlandim28@gmail.com, thalitamaia231@gmail.com, brunomichel00@gmail.com, helioesperidiao@gmail.com.

Resumo

Este trabalho descreve o desenvolvimento de uma estufa inteligente construída em um aquário de vidro, controlada por ESP32 e alimentada por um sistema fotovoltaico. O protótipo integra sensor DHT11, sensor de umidade do solo, duas bombas, ventilador, módulo de relés, painel solar, controlador de carga, bateria de 12 V e conversor CC-CC. A ESP32 executa a automação local e usa o Wi-Fi integrado para trocar mensagens MQTT com o HiveMQ Cloud; um aplicativo Android exibe leituras e alertas e envia comandos. A metodologia compreendeu levantamento bibliográfico, definição da arquitetura elétrica, montagem, programação e simulação de seis cenários operacionais. Nos testes simulados, a irrigação foi acionada para solo seco, a ventilação para temperatura elevada e a segunda bomba somente por comando temporizado; falhas de rede e de sensores foram tratadas sem interromper a lógica local. Os resultados indicam coerência funcional da arquitetura, cuja validação completa ainda depende de ensaios experimentais no protótipo.

Palavras-chave: Estufa inteligente. Automação agrícola. MQTT. Energia solar. Irrigação.
Área do Conhecimento: Ensino Médio/Ensino Médio Técnico.

Introdução

A variabilidade climática, o crescimento da demanda por alimentos e a necessidade de usar água e energia com maior eficiência tornam o monitoramento agrícola cada vez mais relevante. A produção sustentável depende de práticas que conciliem produtividade, conservação de recursos e capacidade de adaptação às mudanças ambientais (FAO, 2017).

Na Agricultura 4.0, sensores, sistemas embarcados e redes de comunicação permitem observar o ambiente de cultivo e executar ações corretivas no momento necessário. A integração desses recursos é uma das bases da agricultura inteligente conectada (Ayaz et al., 2019). A ESP32 é adequada a essa aplicação por reunir processamento, entradas analógicas e digitais e conectividade Wi-Fi no mesmo dispositivo (Espressif Systems, 2024).

A comunicação remota foi estruturada no modelo publicar/assinar do protocolo MQTT. Nesse modelo, um broker recebe mensagens organizadas por tópicos e as encaminha aos clientes inscritos, reduzindo o acoplamento entre o protótipo e o aplicativo (OASIS, 2019). No projeto, a ESP32 publica leituras e alertas no HiveMQ Cloud e recebe comandos enviados pelo aplicativo Android.

O objetivo foi desenvolver e documentar uma estufa inteligente em aquário de vidro, com irrigação, ventilação, apoio ao controle de pragas, supervisão por aplicativo Android, comunicação MQTT e alimentação fotovoltaica, descrevendo a arquitetura elétrica, a pinagem e os resultados de testes simulados.

Metodologia

A pesquisa foi aplicada e de caráter experimental, pois envolveu a construção de um protótipo e a verificação de sua lógica de funcionamento (Gil, 2019). O aquário de vidro foi adaptado como estrutura da estufa e recebeu substrato, plantas, sensores e tubulações. Como ainda não foi concluída uma campanha de medições com instrumentos de referência, os resultados quantitativos apresentados neste artigo são provenientes de simulações.

O desenvolvimento compreendeu levantamento bibliográfico, definição dos requisitos, seleção dos componentes, elaboração do circuito, programação da ESP32, organização dos tópicos MQTT e execução de seis cenários de teste. A montagem reuniu DHT11, sensor de umidade do solo, módulo de relés de três canais, duas bombas, ventilador, painel solar de 30 W, controlador de carga, bateria de 12 V, fusíveis, conversor CC-CC, cabos, mangueiras, HiveMQ Cloud e aplicativo Android.

O DHT11 foi alimentado em 3,3 V, com o pino DATA ligado ao GPIO 13 e resistor de pull-up de 10 kΩ (Aosong Electronics, [s.d.]). O sensor de umidade do solo também recebeu 3,3 V, e sua saída analógica, limitada a 3,3 V, foi ligada ao GPIO 34. Os GPIOs 26, 27 e 25 comandaram, respectivamente, os canais de irrigação, aplicação para manejo de pragas e ventilação do módulo de relés.

Tabela 1 - Componentes, ligações e funções do protótipo.

Elemento	Especificação e ligação	Função
ESP32	VIN 5 V; Wi-Fi integrado	Processar dados, controlar atuadores e executar o cliente MQTT.
Sensor DHT11	3V3; DATA no GPIO 13; pull-up de 10 kΩ	Medir temperatura e umidade relativa do ar.
Sensor de solo	3V3; AO no GPIO 34 (ADC1)	Medir a umidade do substrato para a irrigação.
Relé 3 canais	IN1 GPIO 26; IN2 GPIO 27; IN3 GPIO 25	Comutar irrigação, aplicação e ventilação.
Bomba 1	12 V; 25 W; contato CH1 protegido	Executar a irrigação automática.
Bomba 2	12 V; contato CH2; acionamento temporizado	Apoiar a aplicação autorizada no manejo de pragas.
Ventilador	12 V; contato CH3; alimentação protegida	Auxiliar no controle da temperatura interna.
Painel solar	30 W; terminais PV do controlador	Converter energia solar em energia elétrica.
Controlador	Terminais PV, BAT e LOAD	Gerenciar a carga e proteger a bateria.
Bateria	12 V; fusível no condutor positivo	Armazenar energia para o funcionamento.
Conversor CC-CC	Entrada 12 V; saída regulada em 5 V	Alimentar a ESP32 e o módulo de relés.
HiveMQ e app	Broker MQTT/TLS e cliente Android	Monitorar dados, alertas e comandos remotamente.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O painel solar, o controlador de carga, a bateria de 12 V, os fusíveis e o conversor CC-CC compõem o sistema de alimentação. A saída de 5 V alimenta a ESP32 e o circuito de controle do relé, enquanto os contatos COM/NO comutam as cargas de 12 V. A potência permanece isolada dos GPIOs, e os condutores e dispositivos de proteção devem ser dimensionados para cada carga.

Na comunicação, a ESP32 publica dados no tópico estufa/dados, alertas em estufa/alertas e assina estufa/comandos (HiveMQ, 2026). A condição de solo seco aciona a irrigação; a temperatura elevada ativa a ventilação; e a segunda bomba funciona somente por comando temporizado. Na ausência de rede, a automação local permanece ativa enquanto o sistema tenta restabelecer o Wi-Fi e a sessão MQTT.

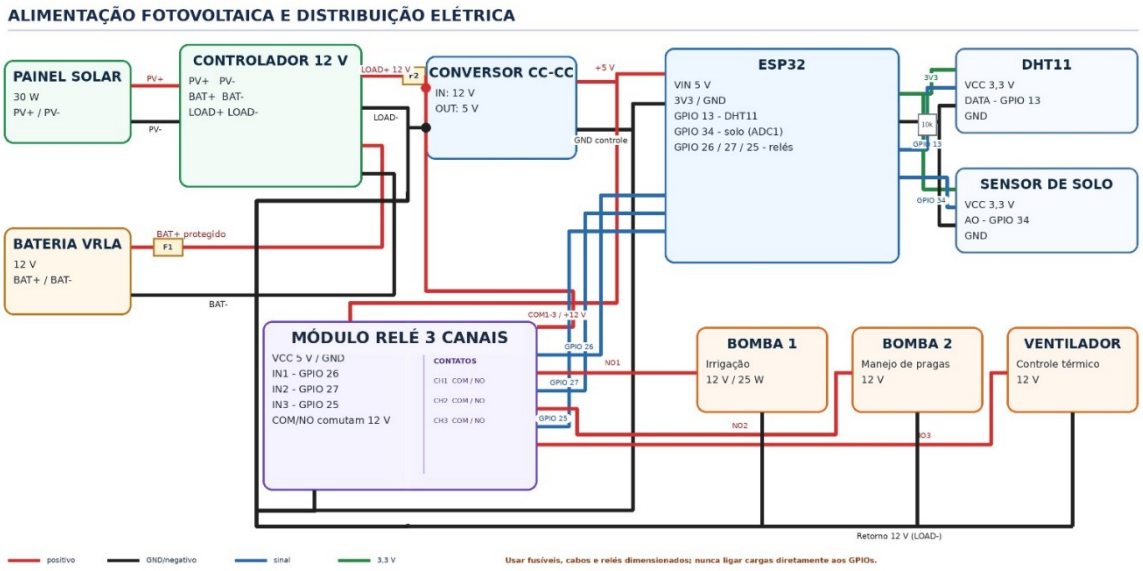
A verificação lógica foi organizada em seis cenários: condição normal, solo seco, temperatura elevada, comando da segunda bomba, interrupção do Wi-Fi e falha de sensor. Em cada execução foram definidos os valores de entrada, aplicado o evento de teste e conferidos o estado dos atuadores, a mensagem enviada ao broker e a indicação apresentada no aplicativo. O cenário normal foi usado como referência para comparar as demais respostas.

Foram considerados satisfatórios os casos em que a saída observada coincidiu com a resposta prevista na Tabela 2. Leituras inválidas foram descartadas antes do acionamento automático; os comandos da segunda bomba receberam duração limitada; e a perda de rede não interrompeu as regras locais. Esse procedimento avaliou a coerência funcional do software, sem substituir medições de precisão, autonomia energética ou desempenho agronômico.

Resultados

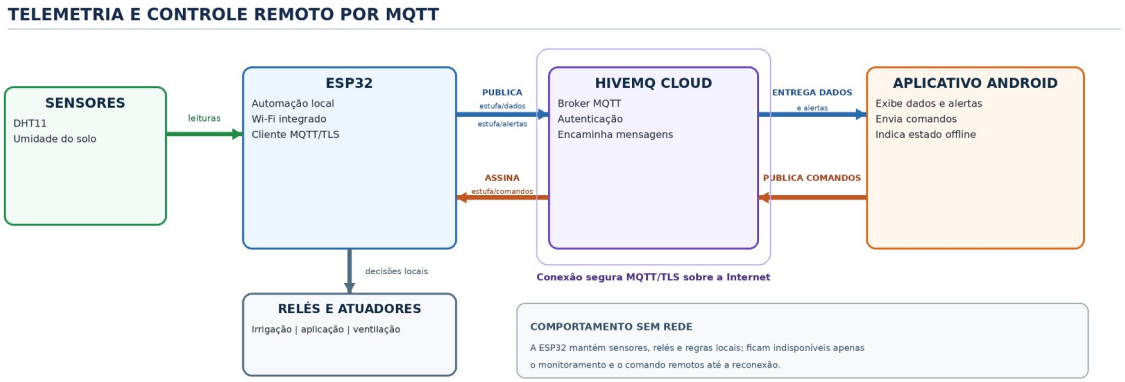
A Tabela 1 relaciona os elementos do protótipo. Para tornar a arquitetura inequívoca, a alimentação, a pinagem e a comutação das cargas são apresentadas no diagrama elétrico da Figura 1, enquanto a Figura 2 mostra separadamente o fluxo de publicação e assinatura das mensagens MQTT.

Figura 1 - Diagrama elétrico da alimentação, dos sensores e dos atuadores da estufa.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 2 - Fluxo MQTT entre ESP32, HiveMQ Cloud e aplicativo Android.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

No diagrama elétrico, os sensores utilizam 3,3 V e compartilham apenas o terra do circuito de controle. Os sinais dos GPIOs acionam as entradas do módulo de relés, sem alimentar diretamente as cargas. No fluxo MQTT, os dados e alertas seguem da ESP32 para o broker e para o aplicativo, enquanto os comandos percorrem o caminho inverso. Essa separação evidencia que o HiveMQ não substitui a lógica local.

As Figuras 3 e 4 registram, respectivamente, a integração do circuito ao sistema fotovoltaico e o protótipo físico construído em aquário de vidro.

Figura 3 - Circuito integrado ao painel solar e ao controlador de carga.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Figura 4 - Protótipo da estufa construído em aquário de vidro.



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

Foram definidos seis cenários sintéticos para verificar sensores, irrigação, ventilação, segunda bomba, alertas e comunicação. Os valores da Tabela 2 representam entradas de teste e não medições coletadas no aquário.

Tabela 2 - Cenários e resultados dos testes simulados.

Cenário	Entradas sintéticas	MQTT/HiveMQ	Resposta esperada
Condição normal	24,8 °C; 64% UR; solo 52%	Dados publicados	Aplicativo atualizado; bomba desligada.
Solo seco	27,1 °C; 52% UR; solo 28%	Dados publicados	Irrigação ligada por 5 s e aviso emitido.
Temperatura elevada	34,2 °C; 41% UR; solo 47%	Alerta publicado	Ventilação acionada e alerta exibido.
Comando de aplicação	Aplicar = ON; duração 2 s	Comando recebido	Bomba 2 ligada por 2 s e estado confirmado.
Wi-Fi interrompido	Última leitura válida	Sessão desconectada	Lógica local ativa; aplicativo indica offline.
Falha de sensor	DHT11 inválido ou AO fora da faixa	Erro publicado	Falha indicada e ação automática bloqueada.

Fonte: Simulação elaborada pelos autores (2026). Dados não experimentais.

Discussão

A arquitetura adotada elimina a necessidade de um módulo externo de comunicação, pois a ESP32 já integra conectividade Wi-Fi (Espressif Systems, 2024). O broker desacopla o aplicativo do protótipo e permite distribuir dados, alertas e comandos por tópicos, conforme o modelo publicar/assinar do MQTT (OASIS, 2019). Essa organização é compatível com aplicações de agricultura inteligente baseadas em sensores e dispositivos conectados (Ayaz et al., 2019).

A irrigação orientada pela umidade do solo pode reduzir acionamentos desnecessários, mas o limite de decisão precisa ser calibrado de acordo com o substrato e a cultura. A ventilação também requer uma faixa térmica e histerese para evitar comutações frequentes. O apoio ao controle de pragas não foi automatizado por diagnóstico: a segunda bomba permanece dependente de comando autenticado, tempo limitado e procedimentos seguros de manejo.

Os resultados simulados confirmam a coerência da lógica programada, mas não comprovam o desempenho do conjunto em condições reais. Precisão dos sensores, estabilidade da comunicação, consumo de energia e resposta das plantas ainda devem ser medidos. Essa limitação também orienta a comparação futura com o protótipo de estufa em pequena escala descrito por Santos et al. (2024).

Conclusão

O objetivo de desenvolver e documentar uma estufa inteligente com alimentação solar, sensores, irrigação, ventilação, apoio ao controle de pragas e supervisão remota foi atendido no nível de protótipo e de validação lógica. A separação entre o circuito elétrico e o fluxo MQTT esclareceu a função de cada componente e mostrou que a comunicação utiliza o Wi-Fi integrado da ESP32.

Nos seis cenários simulados, o sistema apresentou as respostas previstas para operação normal, solo seco, temperatura elevada, comando da segunda bomba, interrupção de rede e falha de sensor. Conclui-se que a arquitetura é adequada a demonstrações educacionais e protótipos de pequeno porte, mas a validação final exige testes no aquário real, calibração dos sensores, medição do consumo energético e registro da comunicação MQTT durante ciclos completos de cultivo.

Referências

AOSONG ELECTRONICS. Temperature and humidity module: DHT11 product manual. Guangzhou: Aosong Electronics, [s.d.].
AYAZ, M. et al. Internet-of-Things (IoT)-based smart agriculture: toward making the fields talk. IEEE Access, v. 7, p. 129551-129583, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932609.
ESPRESSIF SYSTEMS. ESP32 series datasheet. Shanghai: Espressif Systems, 2024. Disponível em: https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents. Acesso em: 18 set. 2026.
FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The future of food and agriculture: trends and challenges. Rome: FAO, 2017.
GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
HIVEMQ. HiveMQ Cloud: getting started guide. Landshut: HiveMQ, 2026. Disponível em: https://docs.hivemq.com/hivemq-cloud/quick-start-guide.html. Acesso em: 18 set. 2026.
OASIS. MQTT Version 5.0. OASIS Standard, 7 mar. 2019. Disponível em: https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html. Acesso em: 18 set. 2026.
SANTOS, C. L. C. dos; CRUZ, O. P. G.; SILVA, P. F. da; FERREIRA, H. L. E. Protótipo microcontrolado de baixo custo e em pequena escala de estufa para cultivo de plantas. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA JÚNIOR DA UNIVERSIDADE DO VALE DO PARAÍBA, 18., 2024, São José dos Campos. Anais [...]. São José dos Campos: Universidade do Vale do Paraíba, 2024.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação Valeparaibana de Ensino e ao Colégio Técnico Antônio Teixeira Fernandes pelo apoio à realização do projeto. Agradecemos também aos professores do curso Técnico em Eletrônica e aos familiares que contribuíram com orientação, incentivo e suporte durante o desenvolvimento.