

Monitoramento de Hortas Urbanas sem Infraestrutura de Rede: Arquitetura de Comunicação IoT com ESP32/ESP-NOW

Lorenzo Michelotti Palma¹, Luís Pedro Davila Zorzi¹,
Rafael Teodósio Pereira¹

¹Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM)
Universidade Federal de Santa Maria (UFSM)
Santa Maria – RS – Brasil

lzmichelotti@gmail.com, luispedro.zorzi@ecomp.ufsm.br, rafatp@redes.ufsm.br

Abstract. *Urban agriculture is a strategy for food security, but monitoring solutions usually depend on the Internet and cloud services, which fail in extreme events such as the 2024 floods in Rio Grande do Sul. This work presents a low-cost IoT system for community gardens that operates without external infrastructure: ESP32 nodes send authenticated readings over ESP-NOW to a coordinator that stores them and serves them over its own Wi-Fi network. On the bench, the radio stays on for 23 ms per 15-minute cycle, all 307 test packets were delivered and forged or replayed packets were rejected. ESP-NOW is compared with BLE, measured on the same hardware, and with LoRa and Zigbee.*

Resumo. *A agricultura urbana é estratégia de segurança alimentar, mas as soluções de monitoramento dependem, em geral, de Internet e de serviços em nuvem, que falham em eventos extremos como as enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul. Este trabalho apresenta um sistema IoT de baixo custo para hortas comunitárias que opera sem infraestrutura externa: nós ESP32 enviam leituras autenticadas via ESP-NOW a um coordenador que as guarda e as disponibiliza em rede Wi-Fi própria. Em bancada, o rádio fica ligado 23 ms a cada ciclo de 15 minutos, os 307 pacotes de teste foram entregues e pacotes forjados ou repetidos foram recusados. O ESP-NOW é comparado ao BLE, medido no mesmo hardware, e ao LoRa e ao Zigbee.*

1. Introdução

A catástrofe ocorrida no Rio Grande do Sul em 2024 evidenciou o impacto dos eventos extremos causados pelas mudanças climáticas [Munhoz 2024]. Nesse contexto, a Agricultura Urbana e Periurbana (AUP) ganha destaque como estratégia de segurança alimentar, por reduzir a dependência de cadeias de abastecimento externas, comprometidas durante esses eventos [Dubbeling 2014].

O manejo de uma horta depende do acompanhamento da umidade do solo e da temperatura e umidade do ar. A Internet das Coisas (IoT) tem sido aplicada a esse monitoramento [Gubbi et al. 2013], mas as soluções existentes dependem, em geral, de conectividade estável e de serviços em nuvem. Hortas comunitárias costumam ter infraestrutura de rede limitada e orçamento incompatível com esses serviços, e a conectividade

é o primeiro recurso a falhar em eventos extremos, justamente quando a produção local de alimentos se torna mais relevante.

Este artigo apresenta um sistema de comunicação IoT de baixo custo para hortas urbanas que opera sem infraestrutura externa: nós sensores ESP32 comunicam-se via ESP-NOW com um coordenador, também ESP32, que guarda os dados localmente e os disponibiliza em rede Wi-Fi própria ao aplicativo do projeto interdisciplinar de fortalecimento da AUP em Santa Maria/RS. Além da arquitetura, relatam-se medições de bancada que caracterizam a carga de dados e o consumo, a comparação com outras tecnologias de rádio e a autenticação das mensagens. A avaliação em campo está em andamento.

2. Trabalhos Relacionados

A seguir, são discutidos alguns trabalhos relacionados ao tema deste estudo, com o objetivo de identificar abordagens, tecnologias e arquiteturas já utilizadas em sistemas de monitoramento de hortas e ambientes agrícolas baseados em IoT. Os trabalhos foram levantados entre maio e julho de 2026, durante o desenvolvimento deste trabalho, no Google Acadêmico, considerando publicações de 2019 a 2026 e as chaves “ESP-NOW”, “ESP32”, “agriculture” e “IoT”; selecionaram-se protótipos implementados, com a arquitetura de comunicação descrita e texto completo disponível.

[Kviesis et al. 2023] monitoraram cinco colmeias por três meses com uma rede ESP-NOW em estrela, cujo nó principal envia os dados por GSM a um servidor remoto; a comunicação foi confiável até 250 m em campo aberto, e o tempo para iniciar uma transmissão caiu de cerca de 5 s, com Wi-Fi, para 5 ms. [Allen Ronald et al. 2025] monitoram as mesmas variáveis desta proposta com ESP-NOW, mas encaminham as leituras por HTTPS a um servidor web, sem quantificar entrega ou consumo. Entre os trabalhos nacionais, o AquaGarden [Santos et al. 2025] envia as leituras de um ESP32 por Wi-Fi ao Firebase, consultado por aplicativo, e [Lima 2023] publica os dados de uma horta hidropônica por MQTT em um serviço de nuvem. A alternativa a essa dependência é processar os dados no local de coleta, a computação de borda [O’Grady et al. 2019]. A Tabela 1 compara os trabalhos pelos critérios que motivam esta proposta; nenhum dos selecionados reúne os três primeiros, que são o seu foco.

Tabela 1. Comparativo entre os trabalhos relacionados e a presente proposta

Critério	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Comunicação entre nós sem roteador	Sim	Sim	Não	Não	Sim
Coleta e consulta sem Internet	Não	Não	Não	Não	Sim
Persistência local dos dados	Parcial ^a	Não	Não	Não	Sim
Acesso por aplicativo móvel	Não	Não	Sim	Não	Previsto
Mensagens autenticadas entre nós	N/I	N/I	–	–	Sim
Consumo caracterizado	Medido	Qualit.	Não	Não	Estimado
Avaliação em campo	Sim	Qualit.	Não	Não	Pendente
Custo reportado	Sim	Não	Não	Não	Sim

(1) Kviesis et al. (2023); (2) Allen Ronald et al. (2025); (3) Santos et al. (2025); (4) Lima (2023); (5) este trabalho. N/I: não informado; Qualit.: relatado sem dados quantitativos; –: não se aplica (nó único).

^a Cópia em cartão SD nos nós; a consulta é feita no servidor remoto.

3. Arquitetura do Sistema

Na arquitetura (Figura 1), os nós sensores enviam as leituras ao coordenador, que as guarda e as disponibiliza ao aplicativo em rede Wi-Fi própria, sem roteador, servidor externo ou Internet.

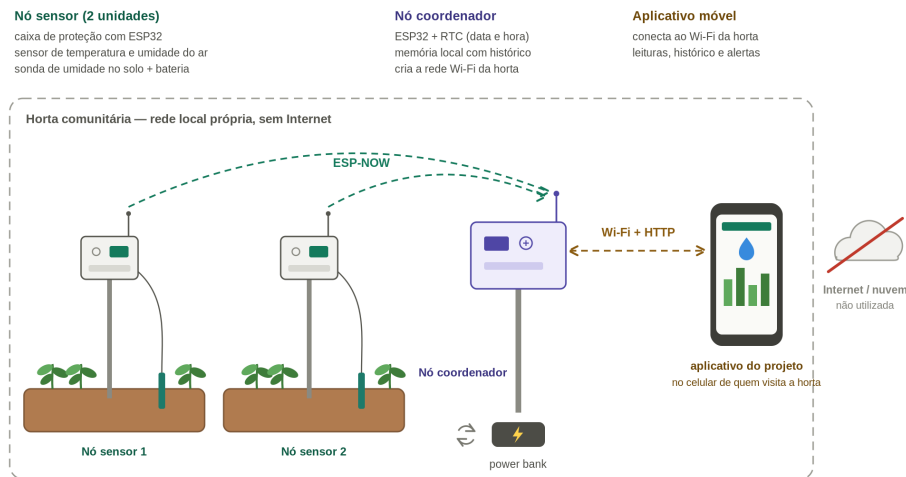


Figura 1. Arquitetura geral do sistema proposto

Nós sensores. Cada nó usa uma placa ESP32 DOIT DevKit V1 com um módulo AHT20 (temperatura e umidade do ar, I²C) e uma sonda capacitiva de umidade do solo, preferida à resistiva por não ter eletrodos expostos à corrosão e calibrada para o solo da horta. A cada 15 minutos, o nó acorda do *deep sleep*, lê os sensores com o rádio desligado, liga o rádio, envia uma mensagem e volta a dormir; sem confirmação (ACK) do ESP-NOW, repete o envio até três vezes. Medido em bancada (mediana de 11 ciclos), o nó fica 170 ms acordado: 47 ms de inicialização, 97,5 ms de leitura (90 ms em *light sleep*) e 22,6 ms com o rádio ligado.

Coordenador. O coordenador, também um ESP32, valida as leituras e as grava na *flash* interna com o LittleFS, resistente a falhas de energia [Haster 2022], em segmentos com rotação: a partição de 1.920 KB comporta cerca de 28 mil registros de 48 bytes, ou 146 dias com dois nós, folga útil porque hortas comunitárias podem passar dias sem visitas. A data e a hora virão de um relógio DS3231 com bateria própria, cuja integração está prevista. Uma interface HTTP/JSON, em implementação, servirá as leituras recentes, o histórico paginado e alertas locais na rede criada pelo modo SoftAP, protegida por WPA2. O rádio opera em um único canal, de modo que os nós transmitem no canal dessa rede [Espressif Systems 2026a].

Mensagens e autenticação. Cada leitura ocupa 22 bytes em formato binário: versão, tipo, contador de reinícios do nó, número de sequência, leituras, tensão da bateria, estado de cada sensor e dados de instrumentação. O nó é identificado pelo MAC de origem, e o par (reinício, sequência) permite ao coordenador separar perdas, duplicatas e reinícios. A criptografia nativa do ESP-NOW (CCMP) não bastou: o coordenador aceitou 39 de 39 quadros sem cifra enviados com o MAC de um par cifrado, pois o evento de recepção não indica se o quadro veio cifrado; além disso, os pares cifrados são limitados a 7 por padrão [Espressif Systems 2026a]. Optou-se por autenticar na aplicação: cada mensagem leva um HMAC-SHA256 truncado em 16 bytes, mínimo recomendado pela

RFC 2104 [Krawczyk et al. 1997], totalizando 38 bytes. A chave de cada nó é derivada, pelo seu MAC, de uma chave mestra guardada só no coordenador, e o coordenador só aceita pares (reinício, sequência) que avancem, retomados do histórico após um reinício, o que impede a repetição de mensagens capturadas. Com o acelerador SHA do ESP32, a assinatura custa 136 μ s.

Custo. Com preços do mercado nacional em agosto de 2026, cada nó sensor custa cerca de 87 reais e o coordenador, com o relógio, 66 reais: cerca de 240 reais para dois nós, sem custo mensal. Não estão incluídos a caixa de proteção e a alimentação dos nós, ainda em definição.

4. Escolha do Protocolo e Caracterização da Carga

Carga e consumo. Cada nó envia 96 mensagens de 38 bytes por dia; com os cabeçalhos, cada quadro ocupa 0,84 ms no ar a 1 Mbps, ou 81 ms por nó por dia. O alto consumo atribuído ao Wi-Fi vem da associação ao ponto de acesso, que leva segundos [Kviesis et al. 2023]; o ESP-NOW não associa [Espressif Systems 2026a], e o rádio fica ligado só 22,6 ms por ciclo. Aplicando a cada fase medida as correntes do *datasheet* do ESP32 [Espressif Systems 2025], como faixa, o ciclo consome de 2,6 a 6,3 mC, ou 0,07 a 0,17 mAh por dia, dos quais o rádio responde por 0,02 a 0,06 mAh. A autonomia é decidida, portanto, pela corrente da placa durante o sono, ainda não medida: com 2.000 mAh, seriam mais de dez anos com os 10 μ A do *chip* (na prática, limitados pela autodescarga), cerca de dois anos com 0,1 mA e cerca de 100 dias com os 0,83 mA medidos por [Kviesis et al. 2023], devidos a componentes da placa, e não ao rádio.

Alternativas. A Tabela 2 compara o ESP-NOW e o BLE, medidos no mesmo nó com o mesmo *firmware* de teste, e o LoRa, calculado pelo *datasheet* do SX1276 [Semtech Corporation 2020]. O BLE perde já ao ligar: o controlador leva 172 ms para iniciar a partir do *deep sleep*, contra 30 ms do Wi-Fi, e o anúncio não tem confirmação de entrega. No coordenador, uma varredura BLE junto ao SoftAP elevou de 0 para 35% as mensagens ESP-NOW retransmitidas e consumiu 79 KB de memória; a documentação classifica SoftAP conectado com BLE como combinação instável [Espressif Systems 2026b]. O ESP32 não tem rádio IEEE 802.15.4: o Zigbee exigiria outro *chip* ou um módulo em cada nó, e o coordenador ainda precisaria do Wi-Fi para o celular. O LoRa ganha em alcance, mas gasta mais por mensagem e exige módulo extra; fica como extensão para áreas maiores, como sugerem [Allen Ronald et al. 2025]. Mulas de dados, como drones de passagem, exigiriam que os nós escutassem o canal periodicamente; aqui, esse papel cabe ao celular de quem visita a horta, no último trecho.

5. Resultados de Bancada e Plano de Avaliação

Em bancada, com um nó a cerca de 1 m do coordenador enviando a cada 2 s, as 307 mensagens enviadas com o coordenador ativo foram entregues na primeira tentativa. Com um celular conectado ao SoftAP pedindo uma página a cada 2 s, as 157 mensagens do ensaio chegaram sem retransmissão, e a página foi servida em 3,7 ms em média. Nenhuma mensagem com chave errada (0 de 5) ou sem assinatura (0 de 6) foi aceita, e repetições de mensagens válidas foram descartadas.

Em campo, em uma horta de Santa Maria/RS, o alcance será medido afastando um nó de 10 em 10 m, com 30 envios por ponto, sem e com obstáculos, registrando a

Tabela 2. Custo de rádio por mensagem de 22 bytes no nó sensor

Tecnologia	Rádio ligado	Carga do rádio	Confirmação
ESP-NOW (medido)	36 ms	1,2–3,7 mC	Sim (ACK)
BLE, só controlador (medido)	205–275 ms	6,4–28 mC	Não
BLE, pilha Bluedroid (medido)	965 ms	29–97 mC	Não
LoRa SF7 / SF12 (calculado, só TX)	57 / 1.483 ms	5–7 / 129–178 mC	Não
Zigbee	sem rádio 802.15.4 no ESP32		

Medidos: mediana de 77 a 98 ciclos, *firmware* de teste sem as otimizações de produção (que levam o ESP-NOW a 22,6 ms). Cargas como faixa das correntes dos *datasheets*. A assinatura (16 bytes) acrescenta 0,13 ms ao ESP-NOW e 26 ms ao LoRa SF7.

entrega e o RSSI. O alcance útil será definido por essas medições, pois depende da altura das antenas e do ambiente. A taxa de entrega, calculada pelos números de sequência, tem meta de 95% em uma semana; a autonomia será acompanhada por 30 dias pela queda da tensão informada pelos nós, o que mede a corrente real das placas durante o sono; e o tempo de resposta, sobre requisições consecutivas do aplicativo.

6. Limitações

A autenticação impede a injeção e a repetição de mensagens, mas não cifra o conteúdo, que pode ser lido por um equipamento próximo; por serem dados ambientais, a criptografia nativa fica como opção. O coordenador é um ponto único de falha: cada nó pode guardar cerca de 200 mensagens (dois dias) nos 8 KB de memória que sobrevivem ao *deep sleep* para reenvio posterior, e o coordenador pode ser alimentado por painel solar, como em [Kviesis et al. 2023]. A validação prevista abrange dois nós em uma única horta, insuficiente para afirmações sobre implantações maiores, e a autonomia é uma estimativa até que a corrente das placas seja medida.

7. Considerações Finais

Este artigo apresentou um sistema de comunicação IoT de baixo custo para hortas comunitárias que opera sem infraestrutura externa. As medições de bancada indicam que, sem associação ao ponto de acesso, o rádio Wi-Fi do ESP32 deixa de dominar o consumo, e que o ESP-NOW gasta menos por mensagem que o BLE (medido no mesmo hardware) e que o LoRa (calculado pelo *datasheet*), com confirmação de entrega. A autenticação resolveu a principal limitação de segurança com custo desprezível. As próximas etapas são concluir a interface HTTP e a integração com o aplicativo, medir a corrente das placas e executar a avaliação em campo.

Declaração de Uso de IA Generativa

Os autores utilizaram o assistente Claude (Anthropic), por meio da ferramenta Claude Code, como apoio na escrita e revisão do código dos *firmwares* e dos programas de análise, no planejamento e na condução dos ensaios de bancada e na revisão do texto deste artigo. Os ensaios foram executados nas placas do projeto, e todo o conteúdo foi revisado pelos autores, que assumem integral responsabilidade por ele.

Referências

- Allen Ronald, A., Abdul Hadi, S., Cibi Sakresh, P. U., and Subhashini, N. (2025). Real-time environmental monitoring using ESP-NOW-based wireless sensor network for sustainable agriculture. In *2025 5th International Conference on Expert Clouds and Applications (ICOECA)*, pages 281–285. IEEE.
- Dubbeling, M. (2014). A agricultura urbana como estratégia de redução de riscos e desastres diante das mudanças climáticas. *Revista de Agricultura Urbana*, (27). Disponível em: https://ruaf.org/assets/2019/11/rau27_completo.pdf.
- Espressif Systems (2025). ESP32 series datasheet, versão 5.3. https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf.
- Espressif Systems (2026a). ESP-NOW — ESP-IDF programming guide. https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/network/esp_now.html.
- Espressif Systems (2026b). RF coexistence — ESP-IDF programming guide v5.5. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/v5.5/esp32/api-guides/coexist.html>.
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., and Palaniswami, M. (2013). Internet of things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7):1645–1660.
- Haster, C. (2022). littlefs: A little fail-safe filesystem designed for microcontrollers. <https://github.com/littlefs-project/littlefs>.
- Krawczyk, H., Bellare, M., and Canetti, R. (1997). HMAC: Keyed-hashing for message authentication. RFC 2104, IETF. <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc2104>.
- Kviesis, A., Komasilovs, V., Ozols, N., and Zacepins, A. (2023). Bee colony remote monitoring based on IoT using ESP-NOW protocol. *PeerJ Computer Science*, 9:e1363.
- Lima, S. J. S. d. (2023). Criação de um protótipo para monitoramento e gerenciamento de horta hidropônica com microcontrolador. <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/78439>. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.
- Munhoz, L. R. (2024). Desastres climáticos e planos de adaptação. *Agroanalysis*, 44(06):37–39.
- O’Grady, M. J., Langton, D., and O’Hare, G. M. P. (2019). Edge computing: A tractable model for smart agriculture? *Artificial Intelligence in Agriculture*, 3:42–51.
- Santos, A. O. d., Lima, B. T., et al. (2025). Sistema de irrigação e monitoramento de solo. *Revista DELOS*, 18(74):1–23.
- Semtech Corporation (2020). SX1276/77/78/79 – 137 MHz to 1020 MHz low power long range transceiver, datasheet rev. 7. <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1276>.