

Análise da Comunicação LoRa em um Sistema Embarcado para Monitoramento Ambiental

Felipe P. Pontes, José R. de Oliveira Neto e Juliano B. Lima

Resumo—Este artigo descreve a implementação de um protocolo ponto a ponto de comunicação sem fio utilizando a tecnologia Long Range (LoRa), focado no monitoramento de variáveis ambientais. O sistema emprega um microcontrolador de baixo custo com firmware desenvolvido no *framework* Arduino e um rádio LoRa de baixo consumo de energia para coletar dados de sensores. A solução proposta visa atender à demanda por monitoramento em áreas urbanas vulneráveis a desastres ambientais e em aplicações na agricultura. Nos testes, o sistema alcançou aproximadamente 270 metros em ambiente aberto e cerca de 90 metros em ambiente interno sem que houvesse perda de pacotes.

Palavras-Chave—LoRa, redes de sensores sem fio, monitoramento ambiental, variáveis ambientais.

Abstract—This article describes the implementation of a point-to-point wireless communication protocol using Long Range (LoRa) technology, focused on environmental variable monitoring. The system employs a low-cost microcontroller with firmware developed in the Arduino framework and a low-power LoRa radio for sensor data collection. The proposed solution aims to meet the demand for monitoring in urban areas vulnerable to environmental disasters and in agricultural applications. In tests, the system achieved approximately 270 meters in open environments and about 90 meters in indoor environments without packet loss.

Keywords—LoRa, wireless sensor networks, environmental monitoring, environmental variables.

I. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio têm se consolidado como uma solução promissora para o monitoramento de variáveis ambientais em tempo real, sendo aplicadas em áreas como agricultura, previsão de desastres naturais e gestão urbana [1]. Em ambientes urbanos que sofrem frequentemente com alagamentos e deslizamentos de encostas, o uso de tecnologias capazes de coletar, transmitir e analisar dados ambientais torna-se cada vez mais necessário. Estudos na literatura demonstram como sistemas baseados em IoT e ciência de dados podem apoiar a previsão e a gestão de eventos críticos, contribuindo significativamente para a tomada de decisões em cenários de risco [2].

Apesar da ampla disponibilidade de protocolos de comunicação sem fio como Wi-Fi e Bluetooth, essas tecnologias apresentam limitações importantes para aplicações em redes de sensores distribuídas em ambientes externos ou de difícil acesso. O Wi-Fi, por exemplo, exige maior consumo de

energia e tem cobertura restrita [3]. Já o Bluetooth, apesar de ser de baixo consumo, possui alcance limitado e menor robustez à interferência, inviabilizando seu uso em sensores geograficamente dispersos [4]. Essas limitações ressaltam a importância de tecnologias como o protocolo de comunicação Long Range (LoRa), que opera com baixo consumo energético e oferece comunicação de longo alcance, que a depender de fatores como o hardware utilizado e condições ambientais, pode alcançar até 15 km de distância [5]. Além disso, o LoRa apresenta um consumo de energia significativamente menor em comparação com outras tecnologias de redes de longa distância, como NB-IoT e Sigfox [6]. Essa característica é essencial para aplicações em campo com alimentação limitada, como em áreas rurais ou de difícil acesso.

Além da escolha do protocolo de comunicação, é fundamental o desenvolvimento de sistemas embarcados modulares, capazes de coletar dados ambientais de forma eficiente e apresentá-los em tempo real, por meio de interfaces locais ou remotas. Diante desse contexto, este artigo propõe o desenvolvimento e a avaliação de um sistema de monitoramento de variáveis ambientais baseado na tecnologia LoRa, voltado para aplicações em áreas urbanas sujeitas a eventos críticos ou em áreas agrícolas. A solução foi implementada em modo ponto a ponto (P2P - *peer-to-peer*), permitindo a comunicação direta entre os dispositivos sem a necessidade de uma infraestrutura de rede intermediária.

O sistema proposto utiliza sensores de temperatura, umidade e luminosidade conectados a um microcontrolador para coletar dados ambientais em tempo real e transmiti-los de forma eficiente a um nó central através de comunicação sem fio. O foco do trabalho está na análise da confiabilidade da comunicação e no alcance do sistema em diferentes ambientes, a partir de testes práticos realizados com protótipos funcionais.

O artigo está estruturado em quatro seções: a Seção 2 descreve o modelo funcional do sistema; a Seção 3 apresenta os resultados dos testes práticos; e a Seção 4 traz as conclusões e perspectivas futuras.

II. MODELO FUNCIONAL

Nesta seção são descritos os módulos de hardware utilizados e a estrutura do firmware do protótipo proposto.

A. Hardware

Para viabilizar a comunicação sem fio com eficiência energética, o projeto emprega o módulo IoT DevKit LoRaWAN da Robocore, que integra o transceptor Semtech SX1276M0 [7], que opera na faixa de frequência de 902 a 928MHz,

F. P. Pontes, J. R. de Oliveira Neto e J. B. Lima, Departamento de Eletrônica e Sistemas, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, e-mail: {felipe.pontes, joserodrigues.oliveiraneto, juliano.lima}@ufpe.br; Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq 442238/2023-1, 312935/2023-4 e 405903/2023-5, e pela FACEPE APQ-1226-3.04/22.

conforme o padrão LoRaWAN para a América do Sul [8]. Este transceptor emprega a modulação LoRa, baseada na técnica de espalhamento espectral por *chirp* (CSS - *chirp spread spectrum*), que proporciona maior sensibilidade do receptor e robustez à interferência quando comparada à modulação FSK (*frequency-shift keying*) [7]. Além disso, o transceptor SMW-SX1276M0 utilizado apresenta bom desempenho em termos de eficiência energética. Durante a transmissão (modo Tx), o módulo consome tipicamente 42 mA com potência de 10 dBm, podendo chegar a 47 mA com 14 dBm. No modo de recepção (modo Rx), o consumo é de apenas 18 mA, e em modo de baixo consumo (*sleep*) o valor é reduzido para cerca de 5,2 μ A [7].

Como descrito em [9], transceptores LoRa podem operar com sensibilidades próximas a -149 dBm, enquanto transceptores em FSK atingem cerca de -125 dBm, dependendo da taxa de dados e das configurações aplicadas. Além disso, sinais LoRa podem ser decodificados mesmo quando estão até 20 dB abaixo do ruído, o que é inviável em sistemas baseados em FSK, que exigem que o sinal útil esteja acima do nível de ruído para uma recepção confiável, mesmo em ambientes com obstáculos ou interferências eletromagnéticas.

A placa de desenvolvimento LoRaWAN DevKit da Robocore, além do transceptor Semtech SX1262, integra o microcontrolador ESP32, modelo DevKit v1, responsável pela configuração e controle dos sensores de temperatura, umidade e luminosidade. Os sinais provenientes destes sensores, já integrados ao kit de desenvolvimento, compuseram o pacote de dados a serem transmitidos periodicamente. Nos testes realizados neste trabalho, foram empregados com o objetivo de verificar o comportamento do sistema utilizando dados capturados em tempo real. As variáveis de temperatura e umidade foram obtidas por meio do sensor DHT11 e a luminosidade foi medida utilizando um sensor LDR (*light dependent resistor*). Além da aquisição dos dados, o ESP32 gerencia a comunicação com o outro nó via LoRa, viabilizando uma solução compacta e modular, adequada para redes distribuídas em áreas remotas ou de difícil acesso.

B. Firmware

O firmware do sistema foi desenvolvido em linguagem C++ utilizando o ambiente de desenvolvimento do Arduino. Para controlar o transceptor LoRa, foi empregada a biblioteca oficial da RoboCore para o módulo LoRa BEE V2 com antena Helix [10]. Essa biblioteca permite acesso simplificado às funcionalidades de comunicação do chip SX1276M0. O sistema opera em modo P2P, permitindo comunicação direta entre os dispositivos sem necessidade de gateways ou infraestrutura LoRaWAN. Esse modo foi escolhido para esta etapa do projeto devido à sua simplicidade e adequação a testes de campo. Contudo, como os módulos LoRa operam em modo *half-duplex*, ou seja, não podem transmitir e receber simultaneamente, foi necessário desenvolver um protocolo de comunicação mestre-escravo. Esse protocolo organiza o canal de comunicação, permitindo não apenas a recepção periódica de dados do nó-escravo, mas também o envio de comandos do nó-mestre, possibilitando o controle remoto de dispositivos



Fig. 1: Diagrama do protocolo mestre-escravo implementado entre os módulos LoRa.

conectados. Tal funcionalidade é essencial em aplicações reais, nas quais o acesso físico aos sensores pode ser inviável.

O funcionamento baseia-se na troca cíclica de mensagens entre os dispositivos, como mostrado no fluxograma da Figura 1, que alternam entre os papéis de transmissão e recepção. A comunicação é iniciada com a definição de uma senha padrão para ambos os nós, que será enviada a cada interação entre eles, e validada pelo nó que está recebendo no momento, que então responde com os dados dos sensores se for o nó-escravo e com uma mensagem de comando se for o nó-mestre. Caso a comunicação seja interrompida, aquele que está no seu momento de enviar fica repetindo o envio da mensagem a cada 15 segundos até voltar a se comunicar e assim o ciclo se restabelece.

Este protocolo permite, além da troca confiável de dados, a possibilidade do nó-mestre enviar comandos ao nó-escravo para ativar atuadores ou solicitar medidas específicas.

III. RESULTADOS OBTIDOS

Com o protótipo do sistema de monitoramento ambiental funcional, foram realizados testes experimentais com o objetivo de validar a comunicação sem fio via LoRa em diferentes cenários físicos, avaliando o alcance efetivo do sistema, a confiabilidade na troca de dados entre os nós e a integridade das mensagens transmitidas. A metodologia dos testes baseou-se no acionamento remoto de atuadores (LEDs) e na transmissão periódica de dados dos sensores conectados ao nó-escravo, enviados ao nó mestre, que os exibia em tempo real no ambiente de desenvolvimento. Os testes foram realizados em dois cenários distintos: um ambiente interno (corredor do Departamento de Eletrônica e Sistemas - DES) e um ambiente externo (estacionamento do Centro de Tecnologia e Geociências - CTG), ambos dentro da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

A. Teste em Ambiente Interno

O primeiro teste foi conduzido no corredor principal do DES-UFPE, que possui aproximadamente 1,5 metro de largura por 170 metros de comprimento. Este ambiente possui paredes de alvenaria em ambos os lados, o que cria uma estrutura de tipo canal — onde as reflexões e múltiplos caminhos do sinal

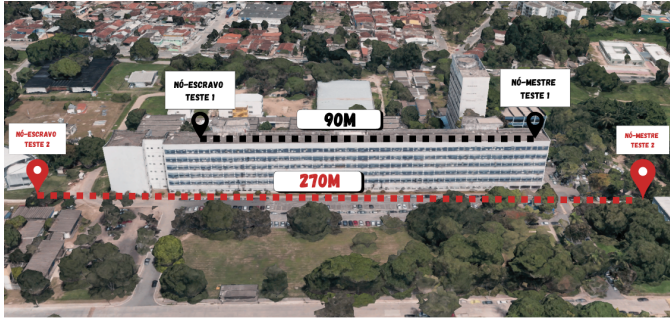


Fig. 2: Visão aérea do CTG-UFPE destacando o posicionamento e distância entre os módulos nos testes realizados

(*multipath*) se tornam predominantes, causando severas interferências por desvanecimento (*fading*), mesmo em situações de visada direta entre os dispositivos ocorre esses fenômenos de interferência intersimbólica [3].

Durante os testes, a cada 10 metros de afastamento entre os nós, era enviado pelo nó-mestre ao nó-escravo um comando de acionamento do LED (um byte de dados), e todos foram recebidos corretamente até a distância máxima de 170 metros. No total, 17 pacotes de 1 byte foram transmitidos e entregues com sucesso. No entanto, os dados enviados pelos sensores, um pacote de 23 bytes transmitido a cada 20 segundos, deixaram de ser recebidos corretamente a partir de aproximadamente 90 metros, indicando que o canal de comunicação se tornou inconsistente para pacotes de dados maiores ou com menor intervalo de espera para transmissão de uma mensagem. Esse comportamento pode ser explicado pela sensibilidade do sinal LoRa à atenuação de paredes e à dispersão de múltiplos caminhos, que prejudicam a integridade dos pacotes de maior carga útil ou exigem sincronização mais estável entre os dispositivos [11]. Este cenário reforça que ambientes internos estreitos, mesmo com linha de visada direta, podem oferecer condições mais adversas à propagação LoRa do que espaços abertos. Para validar a distância máxima em ambiente interno, à distância de 90 metros, ao longo de trinta minutos, foram transmitidos cerca de 90 pacotes de 23 bytes sem erro.

B. Teste em Ambiente Externo

O segundo teste foi realizado no estacionamento do CTG-UFPE, em ambiente externo. A metodologia foi a mesma do primeiro teste, enviando comandos a cada 10 metros e pacotes de sensores a cada 20 segundos, variando apenas o ambiente e, consequentemente, as distâncias atingidas. Nesse cenário, a linha de visada entre os módulos LoRa foi mantida a maior parte do tempo, apesar da presença eventual de pessoas e veículos cruzando o caminho. Durante os testes, foi possível manter o envio dos dados dos sensores a uma distância de aproximadamente 270 metros, quase três vezes maior do que o observado no cenário anterior, como mostrado na Figura 2.

Novamente, o acionamento do LED permaneceu com 100% de aproveitamento. Ao longo dos 270 metros percorridos, foram enviados 27 comandos de 1 byte cada para o nó-escravo, todos recebidos corretamente e acionando o LED com sucesso. Ressalta-se que a distância máxima testada foi limitada pela

impossibilidade de continuar em linha de visada direta no local dos testes. Em relação aos dados dos sensores, foi observada uma breve instabilidade em um determinado momento, em que os pacotes deixaram de ser recebidos pelo nó-mestre. Contudo, a comunicação foi rapidamente restabelecida com o simples reinício do nó-escravo, voltando ao pleno funcionamento com leitura e recepção dos dados em tempo real. Após esse episódio, a conexão permaneceu estável durante mais de uma hora e meia de testes contínuos. No total, mais de 200 pacotes de 23 bytes foram transmitidos e entregues com sucesso na distância de 270 metros.

IV. CONCLUSÕES

Este estudo detalhou a criação de um sistema de comunicação ponto a ponto sem fio baseado em tecnologia LoRa, tendo como objetivo a coleta de dados em tempo real de variáveis ambientais tais como temperatura, umidade e luminosidade utilizando um sistema embarcado de baixo consumo de energia. O sistema demonstrou desempenho satisfatório em relação a confiabilidade da comunicação utilizando o protocolo proposto, especialmente em ambiente aberto, no qual se observou um alcance de comunicação de pelo menos três vezes superior ao alcançado em ambiente interno.

Como trabalhos futuros, destacam-se a realização de mais testes e implementação de estratégias para aumentar a resiliência da comunicação em canais ruidosos, além da integração com servidor e interface para visualização dos dados monitorados.

AGRADECIMENTOS

Felipe P. Pontes agradece ao colega Edinildo Vitor pelo apoio na realização dos testes de campo.

REFERÊNCIAS

- [1] M. U. H. Al Rasyid, E. M. Kusumaningtyas, and F. Setiawan, "Application to determine water volume for agriculture based on temperature humidity using wireless sensor network," in *KCIC*, 2016, pp. 105–112.
- [2] W. Khan et al., "Prediction of flood severity level via processing iot sensor data using a data science approach," *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 3, no. 4, pp. 10–15, 2020.
- [3] IEEE, "IEEE standard for information technology–telecommunications and information exchange between systems - local and metropolitan area networks," *IEEE Std 802.11-2020 (Revision of IEEE Std 802.11-2016)*, pp. 1–4379, 2021.
- [4] A. Loureiro et al., "Redes de sensores sem fio," *Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores*, vol. 21, 01 2003.
- [5] S. Bagwari, A. Gehlot, R. Singh, N. Priyadarshi, and B. Khan, "Low-cost sensor-based lorawan opportunities for landslide monitoring systems on iot platform: A review," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 7107–7127, 2022.
- [6] B. Miles, E.-B. Bourennane, S. Boucherkha, and S. Chikhi, "A study of lorawan protocol performance for iot applications in smart agriculture," *Computer Communications*, vol. 164, p. 148–157, dec 2020.
- [7] S. M. Technologies, "Transceiver LoRaWAN SMT SMW-SX1276M0 – datasheet," 2025, disponível em: https://d229kd5ey79jz.cloudfront.net/1239/Transceiver_LoRaWAN_SMT_SMW-SX1276M0.pdf.
- [8] V. P. S. Junior, "Conheça a tecnologia LoRa® e o protocolo LoRaWAN™," 2016, *Embarcados*. Disponível em: <https://embarcados.com.br/conheca-tecnologia-lora-e-o-protocolo-lorawan/>.
- [9] H. Mroue et al., "Analytical and simulation study for LoRa modulation," in *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*. IEEE, jun 2018.
- [10] ROBOCORE, "Biblioteca para módulo LoRaBee V2," 2025, disponível em: https://github.com/RoboCore/RoboCore_SMW-SX1276M0.
- [11] K. Staniec and M. Kowal, "LoRa performance under variable interference and heavy-multipath conditions," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, no. 1, jan 2018.