

XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

SISTEMA DE TELEMETRIA DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL

Raul de Quadros Cavilha¹; Rafael de Carvalho Bueno² & Tobias Bleninger³

Resumo: A crescente demanda por soluções de Internet das Coisas (*IoT*) para monitoramento remoto impulsiona a busca por tecnologias de comunicação eficientes e acessíveis. Neste contexto, este trabalho detalha a implementação e a validação de um sistema completo de telemetria de baixo custo fundamentado na tecnologia LoRa (*Long Range*). O objetivo central deste trabalho foi desenvolver uma plataforma robusta para a coleta de dados para o monitoramento ambiental em locais de difícil acesso. O sistema desenvolvido com microcontroladores, transmitiu dados via LoRa e MQTT utilizando o serviço HiveMQ. Testes realizados em ambiente interno e campo aberto, ambos sem linha de visada, mostraram alcance máximo de 502 metros. O tipo de antena e o ambiente de operação influenciaram significativamente o desempenho, com ganhos médios de 59% com antena de fibra de vidro e 119% em campo aberto. A comparação entre os módulos 433T20D e 433T33D não indicou superioridade clara. O sistema desenvolvido mostrou-se uma alternativa viável, acessível e adaptável para diferentes cenários de monitoramento ambiental.

Palavras-Chave: LoRa, MQTT, Internet das Coisas.

Abstract: The growing demand for Internet of Things (*IoT*) solutions for remote monitoring drives the search for efficient and affordable communication technologies. In this context, this work details the implementation and validation of a complete low-cost telemetry system based on LoRa (*Long Range*) technology. The main objective was to develop a robust platform for data collection aimed at environmental monitoring in hard-to-reach locations. The developed system, using microcontrollers, transmitted data via LoRa and MQTT using the HiveMQ service. Tests conducted in indoor and open field environments, both without line of sight, showed a maximum range of 502 meters. The type of antenna and the operating environment significantly influenced performance, with average gains of 59% using a fiberglass antenna and 119% in open field conditions. The comparison between the 433T20D and 433T33D modules did not show clear superiority of either. The developed system proved to be a viable, accessible, and adaptable alternative for different environmental monitoring scenarios.

Key-words: LoRa, MQTT, Internet of Things.

1) Estudante de Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: raulcavilha@ufpr.br

2) Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: rafael.bueno@ufpr.br

3) Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: bleninger@ufpr.br

INTRODUÇÃO

Entre os anos de 2000 e 2019, mais de 1 milhão de pessoas morreram em decorrência de desastres naturais ao redor do mundo (UNDRR, 2020). Neste período, foram registrados mais de 7000 eventos, incluindo o terremoto em 2010 no Haiti e o tsunami no Oceano Índico que atingiu a Índia em 2004, resultando em perdas econômicas estimadas em aproximadamente 13 trilhões de reais (UNDRR, 2020). Os desastres hidrológicos causaram mais de 7 milhões de mortes e deixaram cerca de 3,8 bilhões de pessoas feridas ou desabrigadas entre os anos de 1900 e 2020 (Chaudhary & Piracha, 2021). Em 2024 o Rio Grande do Sul enfrentou a maior catástrofe climática da história do estado, resultado em mais de 170 mortes e afetando aproximadamente 90% do território estadual. A tragédia evidenciou a dramática escassez de dados de monitoramento contínuo. Além das catástrofes naturais, as catástrofes classificadas como antrópicas, como o colapso de barragens, também causaram grandes impactos socioambientais e econômicos. Aproximadamente 3842 pessoas morreram e 12 milhões de pessoas foram afetadas por desastres hidrológicos no Brasil entre 2000 e 2024 (EM-DAT, 2025). Dentre os desastres hidrológicos mais recorrentes na América do Sul, destaca-se as inundações e enchentes (WMO, 2021). Nas últimas décadas, esses eventos extremos têm se intensificado e se tornado cada vez mais frequentes, principalmente devido às mudanças climáticas (Fang et al., 2019). É esperado que este cenário se agrave nas próximas décadas, aumentando não apenas a frequência de inundações, mas também a pressão sobre infraestruturas críticas, como as barragens.

O monitoramento contínuo dos parâmetros ambientais é essencial para mitigar os efeitos dos desastres naturais e antropogênicos, evitando ou atenuando tragédias como os rompimentos das barragens de Fundão (Lacaz et al., 2017) e Mariana (Lopes, 2016) e as enchentes que assolaram o estado do Rio Grande do Sul (Wollmann, 2014). No entanto, os valores para aquisição e manutenção de um sistema para monitoramento contínuo de parâmetros ambientais muitas vezes são custosos, o que não permite a cobertura de uma grande área. Dessa forma, regiões com recursos escassos e menos favorecidas socialmente podem estar mais suscetíveis e vulneráveis aos efeitos desses desastres (Wink Junior et al., 2024). Mesmo sistemas comerciais de aquisição de dados sem conectividade remota apresentam custos elevados de implementação. Sistemas de monitoramento do nível de rios e parâmetros meteorológicos podem variar entre R\$20.000 e R\$90.000 reais. No entanto, sistemas de referenciais com comunicação em tempo real são, em média, 45% mais caros do que os sistemas sem conectividade.

Nos últimos anos, novas tecnologias têm sido desenvolvidas como alternativa aos custos de sensores comerciais de referência. Esse avanço resultou no surgimento de sensores de baixo custo, que passaram a ser amplamente utilizados em estudos de monitoramento ambiental, para o monitoramento do nível de rios e instabilidades de taludes de mineração (Folea & Mois, 2015; Mousa et al., 2016). Para viabilizar a aquisição e disseminação de dados ambientais em tempo real, diversas soluções *IoT* (Internet das coisas, do inglês *Internet of Things*) de baixo custo tem sido desenvolvidas, permitindo a coleta e transmissão de informações ambientais em áreas remotas a um custo relativamente reduzido (Khan et al., 2019; Walling et al., 2019). Esse tipo de tecnologia permite a comunicação de diversos sensores e a transmissão de dados entre si, criando um sistema automático de monitoramento mesmo em áreas remotas, sem sistema elétrico ou conectividade wifi. A implementação desses sensores com as aplicações apresenta uma solução à escassez de dados, pois podem ser aplicadas em diversas regiões devido ao seu baixo custo de implementação e manutenção.

Kalyanapu et al. (2023) propuseram o desenvolvimento de um sensor ultrassônico de baixo custo para o monitoramento do nível de rios, com aquisição de dados via conexão wireless e transmissão de dados em tempo real para a nuvem. O estudo demonstrou uma boa correlação entre valores medidos pela estação de referência e pelo sensor desenvolvido, evidenciando a viabilidade da

aplicação desses sensores para o monitoramento do nível de rios. Muitos estudos também vêm utilizando a tecnologia LoRa (*Long Range*) para desenvolverem sistemas de monitoramento, pois o consumo de energia dos módulos físicos é baixo e o alcance de comunicação entre esses módulos são de quilômetros de distância (Augustin et al., 2016). Exemplo da aplicação da tecnologia LoRa no monitoramento ambiental incluem a quantificação da concentração de monóxido de carbono (CO) no ar, o monitoramento contínuo da turbidez da água (Hagh et al., 2024), bem como para o monitoramento de variáveis atmosféricas, como a umidade relativa e pressão absoluta (Folea & Mois, 2015). Além disso, sistemas baseados em LoRa também têm sido empregados para detecção de metano (CH₄) e partículas de poeira em suspensão (Khan et al., 2019).

Embora recentemente muitos estudos tenha apresentado soluções IoT para aquisição e transmissão de dados ambientais (Augustin et al., 2016; Hagh et al., 2024; Khan et al., 2019), poucos avaliam o sistema de comunicação e fornecem detalhadamente os procedimentos para o seu desenvolvimento.

Assim este estudo propõe o desenvolvimento de um sistema de telemetria de baixo custo baseado na tecnologia LoRa e no protocolo de comunicação MQTT, possibilitando a transmissão de dados coletados em áreas remotas para qualquer região do planeta com conectividade WiFi. Além do desenvolvimento do sistema, serão conduzidos testes de alcance da comunicação. Como aplicação exemplificativa, o sistema será equipado com um sensor de nível para o monitoramento de rios e reservatórios, além de sensores de temperatura do ar e temperatura da água, um módulo LoRa para o envio e recebimento dos dados obtidos e um microcontrolador, que irá realizar o envio de comandos para que todos os dados sejam enviados e recebidos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Sistemas de Transmissão de Dados

O sistema desenvolvido consiste em um conjunto operacional para o monitoramento ambiental estruturado em três estações distintas: uma estação de monitoramento, uma estação intermediária e uma estação central, todas conectadas a um módulo LoRa (Figura 1). A estação de monitoramento realiza medições contínuas de parâmetros ambientais, podendo conter diversos periféricos para o monitoramento ou controle de sistemas. Para esta exemplificação a estação de monitoramento contou com sensores de temperatura, umidade e distância, estando configurada para operar em modo *deep sleep*, visando otimizar o consumo energético. O processo inicia-se quando a estação intermediária desperta do modo *deep sleep* e enviar uma requisição à estação de monitoramento através da comunicação LoRa. Ao receber esta requisição, a estação de monitoramento também desperta do modo *deep sleep*, realiza a coleta dos dados ambientais e os empacota em uma estrutura JSON padronizada para envio. Após o envio e recebimento dos dados pela estação intermediária, esta repassa as informações coletadas para a estação central, utilizando novamente uma comunicação LoRa. A estação intermediária, ao finalizar a transmissão dos dados, retorna ao modo *deep sleep* até o próximo ciclo de requisição. Por fim, a estação central recebe esses dados para armazenamento e tratamento futuro, podendo disponibilizá-los via MQTT utilizando serviços como o HiveMQ.

Estação de monitoramento

A estação de monitoramento (Figura 2) foi desenvolvida com o objetivo de demonstrar um sistema integrado para aquisição de parâmetros ambientais. A arquitetura do sistema pode ser facilmente adaptada para incluir diferentes sensores, permitindo a criação de outras estações com funcionalidades específicas. O controle do sistema é realizado por um microcontrolador ATmega328, sendo utilizada, neste caso, a placa Arduino Nano (Figura 2, componente 1). Para exemplificar a aplicação do sistema de monitoramento, foram acoplados ao protótipo um sensor ultrassônico

(HCSR04), para a medição do nível da água em rios e reservatórios, e um sensor infravermelho (MLX90614), destinado ao monitoramento da temperatura do ar.

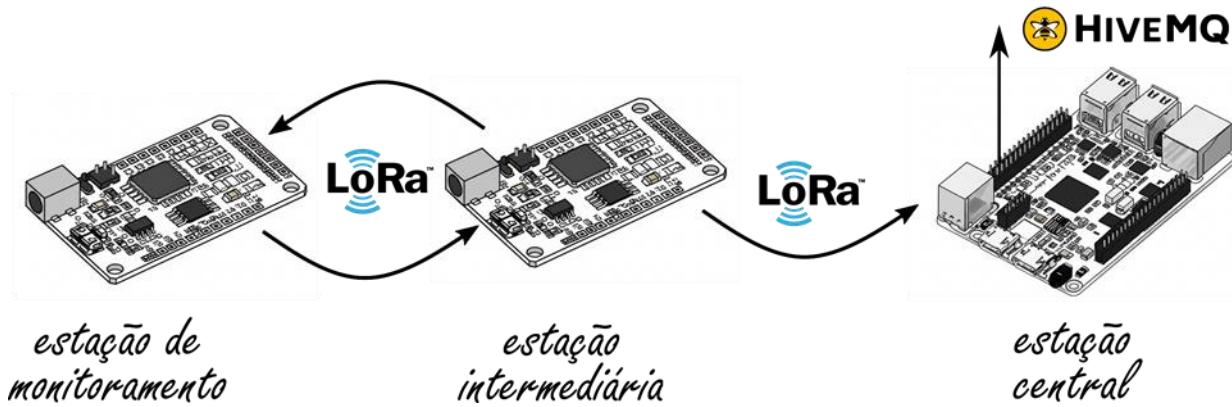


Figura 1: Esquema de comunicação entre os microcontroladores. Estações de monitoramento e a estação intermediária são controladas por microcontroladores do tipo Atmega328 embarcados nas plataformas do tipo Arduino Nano, enquanto a estação central é controlada por um Raspberry Pi.

O sensor HCSR04 (Figura 2, componente 3) é capaz de medir distâncias de 0.2 a 4m com precisão de 3mm. Este tipo de sensor tem sido amplamente utilizado no desenvolvimento de sistemas de monitoramento de baixo custo para a medição do nível de rios (Kalyanapu et al., 2023), apresentando acurácia média de 3cm (Melo Da Silva et al., 2025). Já o módulo de temperatura MLX90614 (Figura 2, componente 4) realiza medições a partir da radiação eletromagnética infravermelha e é capaz de medir a temperatura dos objetos e do ambiente. A faixa de operação para as leituras de temperatura do objeto varia entre -70 C° e +380 C° e a faixa de leitura para a temperatura do ambiente varia entre -40 C° e +145 C°. O módulo possui precisão de 0.5 C°.

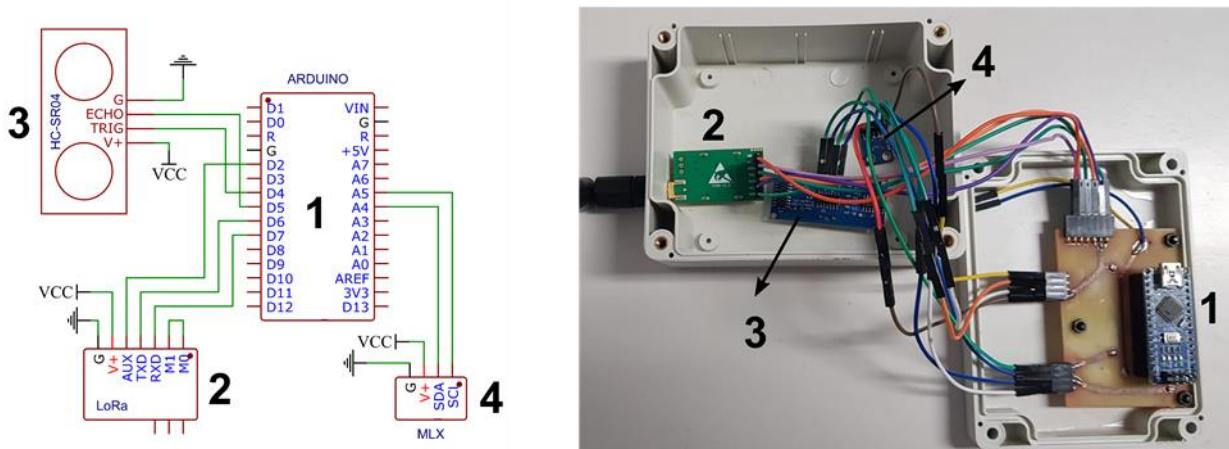


Figura 2: Esquema de conexão da estação de monitoramento e seus componentes. Os elementos numerados (1 a 4) correspondem, respectivamente, ao microcontrolador, módulo LoRa, sensor de temperatura e sensor de distância.

Com o objetivo de transmitir os dados em regiões remotas e sem conectividade à internet, foi integrado ao microcontrolador da estação de monitoramento um módulo LoRa EBYTE E32 (Figura 2, componente 2), operando na frequência de 433 MHz e alimentado por um pino de 3.3 V. O módulo LoRa EBYTE E32 433T20D utiliza comunicação do tipo UART, sendo capaz de transmitir até 58 bytes por envio. O sistema do LoRa foi configurado utilizando o software da própria fabricante e um módulo FTDI para USB, que permite com que todos os parâmetros selecionados no software da fabricante sejam transmitidos para o LoRa em forma de bytes de configuração. Além disso, o módulo

dispõe de um mecanismo de sinalização de status que pode ser utilizado para otimizar o gerenciamento energético, possibilitando, por exemplo, a retomada de operação após períodos em modo de baixo consumo (*deep sleep*). Quando em operação, o módulo possui consumo médio de 100mW em operação contínua. A taxa de transmissão padrão é de 2,4 kbps e a potência de transmissão é de 20 dBm. Devido ao seu baixo consumo e versatilidade para envio de dados em áreas remotas, vários estudos vem utilizando a rede LoRa para a transmissão de dados ambientais (Hagh et al., 2024; Walling et al., 2019; Wu & Liebeherr, 2023).

A antena utilizada para o sistema de monitoramento foi uma antena omnidirecional com ganho de 3.0 dBi, impedância de 50 ohms para faixas de operação em torno de 433 MHz, ideal para o sistema de telemetria proposto devido ao seu baixo comprimento. Para a utilização do sistema em campo, os módulos eletrônicos da estação de monitoramento foram colocados e fixados em uma caixa de acrilonitrila butadieno estireno (Figura 2). Para a alimentação em zonas remotas, o sistema foi energizado com um conjunto composto por três baterias modelo 18650 de 4.2V e capacidade de 8800mAh cada, conectadas em série (12.6 V). As baterias foram acopladas a uma placa de gerenciamento de bateria (BMS) 12.6V 3S 40A com função de balanceamento. A avaliação do nível da bateria pode ser feita através de um sistema de divisor de tensão composto, por resistores de $10k\Omega$ e $3.3k\Omega$, permitindo, por meio de uma porta analógica do microcontrolador, o monitoramento contínuo da tensão da bateria.

Estação Intermediária

A estação intermediária desempenha um papel importante no sistema de telemetria proposto, atuando como ponte entre as estações de monitoramento e a estação central. Embora não seja essencial para o funcionamento do sistema, essa unidade contribui para a organização dos dados ao centralizar as informações provenientes de uma rede de estações de monitoramento, além de potencializar a transmissibilidade entre os nós da rede e a estação central. A estação intermediária também é responsável por requisitar os dados das demais estações de monitoramento da rede. Para isso, a estação é composta por um microcontrolador ATmega328, implementado por meio de uma placa Arduino Nano, conectada a um módulo LoRa EBYTE E32 433T20D, configurado especificamente para realizar a comunicação bidirecional de dados com as demais estações. A antena utilizada na estação foi a antena omnidirecional para comunicação em 433MHz.

A estação intermediária foi configurada para permanecer em modo de baixo consumo energético (*deep sleep*) para preservar a vida útil das baterias e reduzir o consumo geral do sistema. A título de exemplificação foi definida uma periodicidade de aquisição de dados de 15 minutos. Ao receber os dados, a estação intermediária os envia para a estação central para tratamento futuro.

Estação Central

A estação central (Figura 1) foi desenvolvida com o objetivo de realizar a comunicação entre a estação de monitoramento e a estação central, e por isso foi posicionada em um local com acesso à internet. A estação central conta com um Raspberry Pi 4 Modelo B, equipado com processador quad-core ARM Cortex-A72 de 64 bits, frequência de 1,5 GHz, 4 GB de memória RAM LPDDR4 e conexões integradas Wi-Fi dual-band (2.4 GHz e 5 GHz), Bluetooth 5.0, Ethernet Gigabit e portas USB 3.0 e 2.0. O Raspberry Pi 4 foi conectado ao módulo LoRa EBYTE E32 433T33D, semelhante aos utilizados nas estações de monitoramento e na estação intermediária.

A conexão física entre o Raspberry Pi 4 e o módulo LoRa foi estabelecida utilizando a interface serial UART, semelhante ao utilizado na estação de monitoramento. Ao receber os dados da estação

intermediária, a estação central realiza o envio desses dados para uma plataforma online via MQTT. O MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) é um protocolo de comunicação leve projetado para IoT (*Internet of Things*), baseado em um modelo de publicação/assinatura. Nessa arquitetura, dispositivos chamados clientes MQTT não se comunicam diretamente entre si, mas através de um broker MQTT central (servidor). Os clientes podem enviar ou receber mensagens, mas cada mensagem é publicada em um tópico categórico, e o broker encaminha automaticamente essas mensagens a todos os clientes que estiverem inscritos naquele tópico.

Para o sistema proposto, foi utilizado o nível 2 de Qualidade de Serviço (QoS), para evitar duplicações e melhorar a eficiência de transmissão (Lakshminarayana et al., 2024). Para a programação do Raspberry Pi 4 foi realizada em linguagem Python, usando a IDE Thonny. Por fim, todos os dados foram publicados em formato JSON na plataforma HiveMQ, podendo ser visualizados nessa plataforma por meio de acesso à internet por qualquer pessoa com acesso ao endereço do broker e do tópico. O sistema completo desenvolvido, incluindo os códigos-fonte e os esquemas de conexão das estações utilizadas como exemplo, bem como um modelo geral para aplicações, está disponível em <https://github.com/Raulzera123/Monitoramento-LoRa>.

Desconsiderando o custo dos sensores utilizados na estação de monitoramento, o sistema completo de telemetria de baixo custo apresenta um valor médio de R\$ 600. O valor apresenta uma mudança significativa com a adição do Raspberry Pi 4 (50% do valor total do sistema), que pode ser facilmente substituído por outro microcontrolador de menor custo ou modelos genéricos. A expansão do sistema para incluir estações adicionais de monitoramento implica um custo médio complementar de R\$ 100 por unidade, desconsiderando os valores dos sensores de monitoramento utilizados.

Análise do Sistema Desenvolvido

Para avaliar o desempenho do sistema de comunicação desenvolvido, foram realizados ensaios de alcance. O objetivo foi verificar a eficácia da comunicação LoRa e a da estação de comunicação em diferentes configurações.

Distância de comunicação

A configuração experimental foi projetada para determinar a distância máxima de comunicação entre a estação de monitoramento e a estação intermediária. O teste para avaliar o alcance de comunicação dos módulos LoRa foi conduzido em duas etapas, a primeira etapa foi realizada utilizando uma abordagem prática com o módulo receptor no interior do laboratório e uma segunda etapa com o módulo deixado em um ambiente aberto, fora do interior do ambiente. Importante salientar que ambos os testes foram realizados em um ambiente urbanizado.

Durante os testes de alcance, a estação intermediária foi mantida em posição fixa no interior do laboratório, enquanto a estação de monitoramento, referida nesta seção como estação móvel, foi instalada em um veículo, a fim de permitir sua movimentação ao longo dos testes de distância. A estação móvel, composta por os sensores de temperatura e distância, realizou a transmissão contínua de dados via comunicação LoRa, enquanto o veículo se deslocava pela região. Durante o deslocamento, foram estabelecidos diferentes direções e distâncias do laboratório para a realização dos testes. Em cada ponto, foi feita uma avaliação cuidadosa para identificar o exato momento em que ocorreu a perda da comunicação via LoRa.

Para comparar eficientemente o desempenho entre diferentes configurações, foram utilizados dois modelos distintos de módulos LoRa: o EBYTE E32 433T20D (20D) e o EBYTE E32 433T33D (33D). Diferente do módulo 20D, o módulo 33D tem dimensões muito maiores e apresenta uma potência de transmissão mais elevada. Adicionalmente, diferentes combinações desses módulos foram testadas utilizando duas antenas específicas: uma antena de fibra de vidro modelo TX433-BLG-40 (Fibra) acoplado a um adaptador do tipo N-SMAJ e uma antena 5 DBi SMA Macho 433MHz (SMA). Embora ambas tenham ganho próximos de 5 dBi, a antena de fibra de vidro tem menos perdas e possui melhor padrão de radiação, suportando chuvas e ventos sem perda significativa no desempenho. Essa combinação permitiu avaliar o impacto dos tipos de antena e módulos LoRa no alcance efetivo da comunicação. Ao final dos testes, foi possível traçar um raio aproximado de distância média em que cada configuração apresentava perda de sinal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O gráfico abaixo (Figure 3) exemplifica os dados disponibilizados durante um período de 24 horas via MQTT utilizando o serviço HiveMQ enviadas pela estação de monitoramento desenvolvida. O sistema completo está disponível em <https://github.com/Raulzera123/Monitoramento-LoRa.git>, onde o sistema apresentado neste artigo pode ser encontrado na aba *aplicação*, enquanto um modelo para outras aplicações está disponível em *template*.

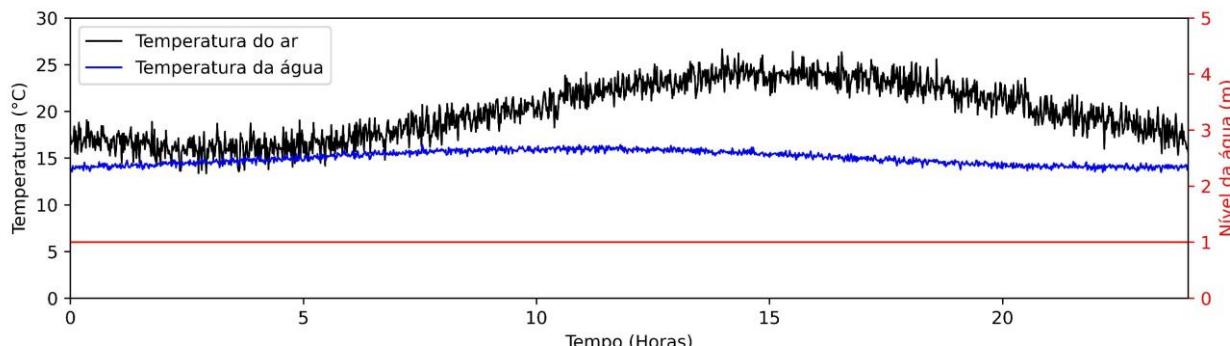


Figura 3: Dados coletados pela estação central e enviadas via MQTT através do HiveMQ. Os dados foram gerados artificialmente pela estação de monitoramento apenas para testar a comunicação e a transmissibilidade das informações.

Análise do alcance do sinal

Os experimentos com o módulo LoRa EBYTE E32 433T20D, utilizando diferentes tipos de antena, foram realizados em dois cenários distintos: ambiente interno, com captação no interior do laboratório (Figura 4a), e campo aberto (Figura 4b). Nos testes em ambiente interno, a antena bidirecional SMA padrão apresentou um alcance máximo de 129 metros. Em contraste, a utilização da antena de fibra de vidro, sob as mesmas condições, resultou em um alcance máximo de 250 metros, representando um aumento de 94% em relação ao desempenho da antena SMA. Considerando as diferentes combinações de módulos e ambientes testados, a antena de fibra de vidro demonstrou uma melhora consistente no alcance do sinal, com um incremento médio de 59% em comparação aos resultados obtidos com a antena SMA Macho 433 MHz. Esses resultados estão de acordo com estudos anteriores que indicam que a escolha da antena pode influenciar significativamente o desempenho da comunicação em sistemas LoRa, sendo apontado que o uso de antenas de maior ganho pode resultar em melhorias substanciais no alcance (Daud et al., 2017).

A comparação entre os dois módulos LoRa avaliados, o EBYTE E32 433T33D e o EBYTE E32 433T20D, não revelou resultados consistentes que justifiquem a adoção de um módulo em

detrimento do outro. As variações médias de alcance entre os módulos foram da ordem de 16%, dependendo das configurações adotadas (Figura 4). O módulo EBYTE E32 433T20D apresentou desempenho superior nos testes em ambiente interno com o uso da antena de fibra de vidro (16% de incremento) e em campo aberto com a antena bidirecional SMA (15%). Por outro lado, o módulo EBYTE E32 433T33D obteve melhor desempenho nas condições internas com a antena SMA (12% de aumento) e em ambiente externo com a antena de fibra de vidro (19%). Esses resultados indicam que o desempenho relativo entre os módulos é sensível às combinações específicas de antena e ambiente de operação, não sendo possível estabelecer uma tendência clara de superioridade entre eles.

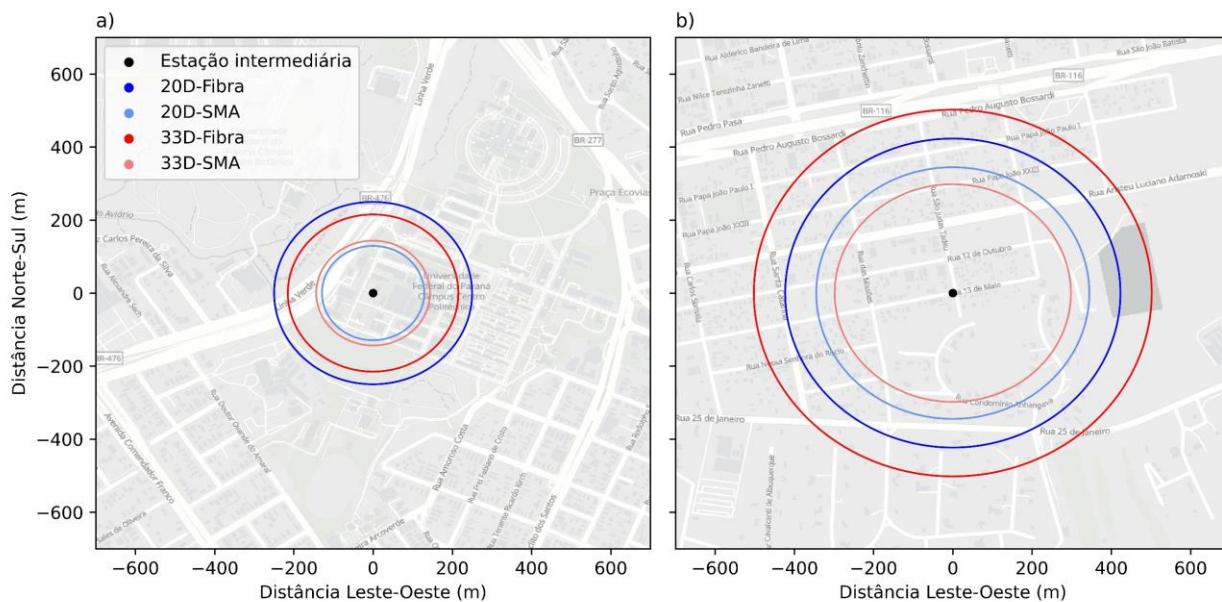


Figura 4: Teste de alcance do sistema de telemetria de baixo custo desenvolvido. As coordenadas foram definidas de forma que a estação intermediária corresponda à origem do mapa. As diferentes cores representam as distintas combinações entre módulos LoRa e tipos de antena utilizados. A sigla 20D refere-se ao módulo EBYTE E32 433T20D, enquanto 33D indica o módulo EBYTE E32 433T33D. O termo Fibra corresponde à antena de fibra de vidro modelo TX433-BLG-40, e SMA refere-se à antena de 5 dBi com conector SMA Macho, frequência de operação em 433 MHz.

Embora o módulo 20D possua uma potência de transmissão ligeiramente inferior (20 dBm) em comparação ao modelo 33D (30 dBm), ambos utilizam o mesmo chip base, o Semtech SX1278. Estudos anteriores também utilizaram módulos baseados neste chip para aplicações de comunicação LoRa, relatando alcances semelhantes, com distâncias de até 1,5 km em condições de linha de visada (Swain et al., 2021; Daud et al., 2017). Uma análise mais detalhada realizada por Daud et al. (2017) indicou que o SX1278, chip utilizado nos módulos avaliados neste estudo, apresenta desempenho superior de alcance quando comparado ao SX1272, embora com um consumo de energia até 30% maior. Além desses, outros módulos com diferentes chips base são amplamente empregados na literatura para comunicação LoRa, incluindo os modelos com SX1272 (Bor et al., 2016; Krizanovic et al., 2023), SX1276 (Wu et al., 2023; Isa et al., 2024; Krizanovic et al., 2023) e SX1301 (Taha et al., 2019), apresentando variações significativas nas distâncias alcançadas, de acordo com as características de cada aplicação.

A operação do sistema em ambiente aberto resultou em um aumento médio de 119% no alcance do sinal em comparação aos resultados obtidos em ambiente interno. Essa tendência foi observada de forma consistente em todas as combinações de módulos e antenas testadas (Figura 4), evidenciando a influência direta das condições ambientais na propagação de sinais de radiofrequência em aplicações LoRa. Vale destacar que as grandes distâncias de comunicação frequentemente

relatadas na literatura, como coberturas superiores a 15 km (Taha et al., 2019), são geralmente obtidas apenas em condições ideais de linha de visada (LoS), nas quais as antenas estão posicionadas a alturas adequadas, livres de obstruções físicas e com visibilidade direta entre os pontos de transmissão e recepção.

Nos experimentos conduzidos neste estudo, ambos os cenários de teste foram caracterizados por condições sem linha de visada (NLoS), sendo que o ambiente interno apresentou maior interferência de estruturas físicas em comparação ao ambiente externo. Nessas condições, os alcances máximos obtidos foram de 250 metros para o ambiente interno e 502 metros para o ambiente externo (Figura 4). Adicionalmente, estudos prévios relatam reduções significativas no alcance de comunicação em áreas urbanas densamente povoadas. Isa et al. (2024), por exemplo, observaram que o alcance, que pode atingir 7 km em regiões com baixa densidade de edificações, foi limitado a aproximadamente 700 metros em áreas de alta densidade urbana.

Uma estratégia viável para ampliar o alcance da comunicação em sistemas LoRa é a expansão da rede de monitoramento por meio da implementação de nós intermediários. Esses nós, além de coletarem dados localmente, atuam como retransmissores, repassando as informações recebidas de outras estações em direção à estação central. Esse modelo em cascata, também conhecido como rede *multi-hop*, permite estender significativamente o campo de cobertura do sistema (Bor et al., 2016; Wu et al., 2023).

No entanto, apesar de sua eficácia em cenários localizados, a escalabilidade da rede LoRa apresenta limitações. Estudos demonstram que a tecnologia oferece bom desempenho para redes com até 120 nós cobrindo áreas de até 38.000 m², mas não recomendam sua ampliação para aplicações em escala de elevado grau (monitoramento multi-regional) com elevado número de dispositivos, devido à crescente interferência e à degradação da taxa de entrega de pacotes (Bor et al., 2016).

CONCLUSÃO

O sistema de telemetria de baixo custo desenvolvido demonstrou desempenho satisfatório para aplicações de monitoramento com comunicação LoRa, apresentando alcance máximo de 502 metros em campo aberto, mesmo em condições sem linha de visada. Os resultados destacam a influência significativa do tipo de antena, do ambiente de operação e das configurações dos módulos na qualidade da transmissão, com ganhos médios de 59% para a antena de fibra de vidro e de 119% em ambientes externos. A comparação entre os módulos EBYTE E32 433T20D e 433T33D não indicou diferenças consistentes que justifiquem a preferência por um deles. Embora estratégias como o uso de nós intermediários possam ampliar a cobertura, limitações de escalabilidade devem ser consideradas. O sistema, com código-fonte disponível publicamente, oferece uma alternativa acessível e adaptável para diferentes cenários de monitoramento ambiental.

AGRADECIMENTOS

The authors acknowledge the financial support of the PROEXT-PG program (CAPES). This article is part of the project “Laboratório Didático de Internet das Coisas para a Sustentabilidade”, which is among the graduate extension initiatives at UFPR linked to the PROEXT-PG program (CAPES) and the extension projects Água & Ação and LUX, as well as the graduate programs PPGERHA and PPGEA. Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Tobias Bleninger agradece a bolsa de produtividade do CNPq, processo número 313491/2023-2, chamada número 09/2023. Rafael de Carvalho Bueno e Raul de Quadros Cavilha agradecem a CAPES pela bolsa de pesquisa – código de financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., & Townsley, W. M. (2016). A study of Lora: Long range & low power networks for the internet of things. *Sensors (Switzerland)*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/s16091466>
- Bor, M., Roedig, U., Voigt, T., & Alonso, J. M. (2016). Do LoRa low-power wide-area networks scale? *MSWiM 2016 - Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, 59–67. <https://doi.org/10.1145/2988287.2989163>
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED); United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). The HumanCost of Disasters: An Overview of the Last 20 Years (2000–2019). Disponível em: <https://www.undrr.org/media/48008/download>. Acesso em: Janeiro de 2025
- Chaudhary, M. T., & Piracha, A. (2021). Natural Disasters—Origins, Impacts, Management. *Encyclopedia*, 1(4), 1101–1131. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1040084>
- Daud, S., Yang, T. S., Romli, M. A., Ahmad, Z. A., Mahrom, N., & Raof, R. A. A. (2018). Performance Evaluation of Low Cost LoRa Modules in IoT Applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 318(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/318/1/012053>
- EM-DAT. Emergency Management Database, CRED, Catholic University of Louvain. 2021. Disponível em: <http://www.public.emdat.be>. Acesso em: Janeiro de 2025
- Folea, S. C., & Mois, G. (2015). A low-power wireless sensor for online ambient monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 15(2), 742–749. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2351420>
- Hagh, S. F., Amngostar, P., Chen, W., Sheridan, J., Williams, C. J., Morales-Williams, A. M., Huston, D., & Xia, T. (2024). A Low-Cost LoRa Optical Fluorometer-Nephelometer for Wireless Monitoring of Water Quality Parameters in Real Time. *IEEE Sensors Journal*, 24(13), 21511–21519. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2024.3403416>
- Isa, A. A. H., & Iqbal, M. T. (2024). Remote Low-Cost Web-Based Battery Monitoring System and Control Using LoRa Communication Technology. *Journal of Electronics and Electrical Engineering*. <https://doi.org/10.37256/jeee.3120244173>
- Kalyanapu, A., Owusu, C., Wright, T., & Datta, T. (2023). Low-Cost Real-Time Water Level Monitoring Network for Falling Water River Watershed: A Case Study. *Geosciences (Switzerland)*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/geosciences13030065>
- Khan, N., Khattak, K. S., Ullah, S., & Khan, Z. (2019). A low-cost IoT based system for environmental monitoring. *Proceedings - 2019 International Conference on Frontiers of Information Technology, FIT 2019*, 173–178. <https://doi.org/10.1109/FIT47737.2019.00041>
- Križanović, V., Grgić, K., Spišić, J., & Žagar, D. (2023). An Advanced Energy-Efficient Environmental Monitoring in Precision Agriculture Using LoRa-Based Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 23(14). <https://doi.org/10.3390/s23146332>
- Lacaz, F. A. de C., Porto, M. F. de S., & Pinheiro, T. M. M. (2017). Tragédias brasileiras contemporâneas: o caso do rompimento da barragem de rejeitos de Fundão/Samarco. *Revista Brasileira de Saúde Ocupacional*, 42(0). <https://doi.org/10.1590/2317-6369000016016>
- Lakshminarayana, S., Praseed, A., & Thilagam, P. S. (2024). Securing the IoT Application Layer from an MQTT Protocol Perspective: Challenges and Research Prospects. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*. <https://doi.org/10.1109/COMST.2024.3372630>
- Lopes, L. M. N. (2016). *O rompimento da barragem de Mariana e seus impactos socioambientais The rupture of the Mariana dam and its social-environmental impacts* (Vol. 5, Issue 1). <http://periodicos.pucminas.br/index.php/sinapsemultipla>
- Melo Da Silva, G., De Carvalho Bueno, R., & Bleninger, T. (2025). Desenvolvimento de um sensor ultrassônico para medição contínua do nível da água de corpos d'água e uma análise da influência da temperatura do ar.
- Mousa, M., Zhang, X., & Claudel, C. (2016). Flash Flood Detection in Urban Cities Using Ultrasonic and Infrared Sensors. *IEEE Sensors Journal*, 16(19), 7204–7216. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2016.2592359>
- Swain, M., Hashmi, M. F., Singh, R., & Hashmi, A. W. (2021). A cost-effective LoRa-based customized device for agriculture field monitoring and precision farming on IoT platform. *International Journal of Communication Systems*, 34(6). <https://doi.org/10.1002/dac.4632>
- Taha, A., Feteicha, M., Taha, A. A., Feteicha, M. F., & Abdul, W. (2019). Performance Evaluation for LoRa Transceiver. *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSE)*, 8(2). www.IJCSE.org
- Walling, S., Sengupta, J., & Das Bit, S. (2019). A Low-cost Real-time IoT based Air Pollution Monitoring using LoRa. <https://www.instructables.com/id/How-to-Receive->
- Wink Junior, M. V., dos Santos, L. G., Ribeiro, F. G., & da Trindade, C. S. (2024). Natural disasters and poverty: evidence from a flash flood in Brazil. *Environment, Development and Sustainability*, 26(9), 23795–23816. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03623-0>
- Wollmann, C. A. (2014). *ENCHENTES NO RIO GRANDE DO SUL DO SÉCULO XXI the floods in Rio Grande do Sul during 21th century*. 1, 79–91. <https://doi.org/10.4215/RM2014.1301>
- World Meteorological Organization. [WMO] (2021). WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019). WMO No. 1267. Geneva, Switzerland. Disponível em: https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/1267_Atlas_of_Mortality_en-final_-26.07.2021.pdf. Acesso em: Janeiro de 2025
- Wu, D., & Liebeherr, J. (2023). A Low-Cost Low-Power LoRa Mesh Network for Large-Scale Environmental Sensing. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(19), 16700–16714. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3270237>