

Sistema de Telemetria de Baixo Custo: Avaliação de um Sistema LoRa no Monitoramento Ambiental

Maria Eduarda Timos¹; Rafael de Carvalho Bueno² & Tobias Bleninger³

Resumo: Este estudo avalia um sistema telemétrico de baixo custo baseado no módulo Heltec ESP32 LoRa V3 para monitoramento ambiental autônomo. A modelagem da descarga de baterias Li-Ion identificou um limiar crítico em 4,11 V. Resultados demonstram que o modo *Deep Sleep* reduz o consumo energético em 41 vezes, garantindo uma autonomia projetada de 57 dias. Em testes de campo, o uso de uma antena de fibra de vidro (6 dBi) mitigou obstruções topográficas, estendendo o alcance de 8,97 m para 98 m em condições sem linha de visada (NLoS) e superando 317 m em campo aberto (LoS). A arquitetura valida-se como uma solução resiliente e de baixa manutenção para o sensoriamento remoto.

Palavras-Chave: LoRa; Monitoramento Contínuo; Eficiência Energética.

Abstract: This study evaluates a low-cost telemetric system based on the Heltec ESP32 LoRa V3 module for autonomous environmental monitoring. Battery discharge modeling identified a critical threshold at 4.11 V. Results show that Deep Sleep mode reduces energy consumption by 41 times, enabling a projected autonomy of 57 days. Field tests demonstrated that a fiberglass antenna (6 dBi) effectively mitigated topographical obstructions, extending the range from 8.97 m to 98 m in non-line-of-sight (NLoS) conditions and exceeding 317 m in open fields (LoS). The architecture is validated as a resilient, low-maintenance solution for remote sensing.

Key-words: LoRa; Environmental Monitoring; Energy Efficiency.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a escassez de recursos tem tornado o monitoramento ambiental contínuo uma ferramenta fundamental para a preservação do meio ambiente e a mitigação de catástrofes ambientais. O monitoramento ambiental depende, em grande parte, de estações comerciais, que exigem infraestrutura elétrica complexa e manutenção especializada, inviabilizando sua implantação em alta densidade, especialmente em áreas remotas ou com restrições orçamentárias (Helal *et al.*, 2022). Esse obstáculo é agravado pela integração de telemetria, que frequentemente impõe dependência tecnológica de fabricantes exclusivos e eleva os custos operacionais em até 100 vezes quando comparada a *dataloggers* de coleta manual (Helal *et al.*, 2022).

Para superar essas barreiras, a tecnologia LoRa (*Long Range*) tem se consolidado como uma solução de grande relevância. A literatura recente apresenta diversas aplicações que comprovam a eficiência do LoRa em diferentes cenários. Helal *et al.* (2022) desenvolveram uma estação para o monitoramento limnológico com alcance de comunicação de 3,2 km sobre a água.

1) Estudante de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: eduardatimos@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

O sistema utiliza uma bateria de Li-ion de 3,7 V e 2600 mAh, permitindo uma autonomia de aproximadamente 8 anos. Em aplicações de larga escala, Wu & Liebeherr (2023) propuseram uma rede para o monitoramento agrícola com cobertura expansível para grandes áreas rurais com apenas duas pilhas AA. Ragnoli *et al.* (2025) fizeram um sistema para o monitoramento de cavernas subterrâneas com alcance de 60 metros através de rochas maciças. O sistema foi desenvolvido para uma operação contínua por um ano com uso de baterias LiPo de 2200 mAh. Por fim, Gaitán *et al.* (2022) desenvolveram subestações para o monitoramento de estuários sujeitos à dinâmica de marés com enlaces estáveis a distâncias de até 750 metros, mantendo a eficiência energética típica de subestações de baixa potência.

Embora diversos estudos venham demonstrando a eficácia do monitoramento ambiental com sistemas de baixo custo, evidenciando a possibilidade de desenvolver e operar estações com custo inferior a US\$ 15 (Wu & Liebeherr, 2023; Helal *et al.*, 2022), a literatura ainda apresenta predominância de arquiteturas modulares, baseadas no uso de módulos externos de rádio conectados a placas de desenvolvimento genéricas (Alcalá-Rodríguez *et al.*, 2026; Barbosa *et al.*, 2024; Cavilha *et al.*, 2025).

Apesar da integração e do baixo consumo, o uso de placas como a Heltec ESP32 LoRa no monitoramento ambiental ainda enfrenta incertezas sobre sua robustez em condições reais. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo desenvolver e avaliar um sistema de telemetria de baixo custo baseado na versão V3 deste módulo. A análise foca na eficiência energética e no alcance do sinal para atestar se tal arquitetura unificada constitui uma solução autônoma e resiliente, capaz de garantir estabilidade na comunicação e otimizar a vida útil do sistema.

MÉTODOS

Sistema de monitoramento

Unidade de Transmissão

A unidade de transmissão utiliza a plataforma Heltec WiFi LoRa 32 (V3), equipada com o microcontrolador ESP32-S3 e o transceptor Semtech SX1262 em 433 MHz (Figura 1). Para validar as funções telemétricas, o sensor DHT22 foi integrado à unidade de transmissão para a aquisição de dados. Este dispositivo combina um sensor de umidade com um sensor de temperatura conectado a um microcontrolador de 8 bits. O sensor opera em uma faixa de 0 a 99,9% para umidade relativa e de -40 a 80 °C para temperatura. A precisão típica para umidade é de $\pm 2\%$ RH, enquanto para temperatura é de $\pm 0,5$ °C (Aosong Electronics, 2026).

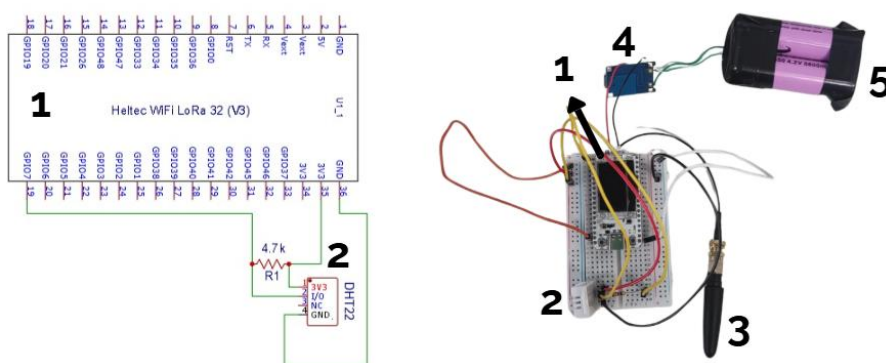


Figura 1. Configuração de hardware da Unidade de Transmissão. A imagem apresenta a integração entre o microcontrolador (1) Heltec V3, o sensor (2) DHT22 e a (3) antena *stub* de 2 dBi. O sistema de alimentação é composto por um (4) módulo de carga USB e um (5) pack de baterias Li-Ion com circuito de proteção BMS externo acoplado.

A alimentação da unidade de transmissão consistiu em duas células Li-Ion de 3,7 V e 8800 mAh em paralelo (17600 mAh), geridas por um módulo BMS 1S externo (chips DW01 e 8205A) implementado para garantir uma proteção de carga e descarga superior ao sistema nativo da placa Heltec V3. A tensão do conjunto foi monitorada por um conversor analógico-digital (ADC) do microcontrolador via pino analógico e divisor de tensão interno. A unidade de transmissão foi equipada com uma antena *stub* omnidirecional de pequeno porte com frequência de 433 MHz (Figura 1). O firmware da unidade de transmissão foi desenvolvido em linguagem C++, utilizando a plataforma Arduino IDE e a biblioteca *RadioLib* (Viguls, 2024). A unidade de transmissão realiza a leitura dos sensores, consolida os dados em um único vetor de caracteres e os transmite via LoRa. O envio de dados foi configurado para ocorrer em diferentes intervalos de tempo, conforme discutido na Seção “*Ensaio da autonomia do sistema*”.

Unidade Receptora

A unidade receptora atua como um *gateway* fixo, operado por apenas um módulo Heltec WiFi LoRa 32 (V3), que permanece em escuta contínua para avaliar o impacto do ganho passivo de diferentes antenas, detalhadas na seção seguinte. Para evitar a recepção de pacotes indesejados provenientes de outras redes LoRa, o sistema utiliza um código de identificação. Após a recepção via LoRa, o dispositivo atua como ponte para a nuvem via Wi-Fi, encaminhando os dados ao Google Apps Script através de requisições HTTPS com os parâmetros incorporados na URL.

Análise do alcance de comunicação em campo

Para avaliar a robustez e os limites operacionais da rede LoRa, foram realizados ensaios em dois cenários distintos. O primeiro, em ambiente com topografia irregular e densa biomassa, simulando uma condição de não-linha de visada (NLoS) com obstrução crítica. O segundo, sob condições de linha de visada (LoS), utilizou o transmissor a 5 metros de altura para garantir comunicação desobstruída. Buscando o equilíbrio entre a portabilidade do sensor e o alcance da rede, foram testadas duas configurações de antenas: (i) uma antena *stub* omnidirecional de 2 dBi, a mesma utilizada na unidade de transmissão (Figura 1), e (ii) uma antena de fibra de vidro com ganho de 6 dBi.

Durante os ensaios, a unidade receptora permaneceu fixa em uma coordenada geográfica conhecida, enquanto a unidade de transmissão foi deslocada radialmente em eixos cardeais. Para o mapeamento das distâncias percorridas, foi utilizado o aplicativo *Geo Tracker*. Simultaneamente, o transmissor enviou pacotes contínuos contendo os dados ambientais e a intensidade de sinal (RSSI) entre as unidades em comunicação, permitindo correlacionar a degradação da potência de rádio à distância física e às características do terreno.

Ensaio da autonomia do sistema

Para analisar a autonomia e a curva de descarga do sistema, as unidades foram posicionadas a 2,5 metros de distância em modo LoS, garantindo que a degradação dos dados fosse causada exclusivamente pelo consumo energético do hardware.

Para os ensaios de autonomia, o sistema foi avaliado sob três perfis de consumo distintos: (i) um regime de estresse máximo, configurado com transmissões contínuas em 1 Hz e sem a utilização de recursos de economia de energia; (ii) um regime de operação nominal, que manteve um intervalo de transmissão de 15 min com os periféricos ativos; (iii) e, por fim, o regime de eficiência, caracterizado pelo uso do modo de hibernação profunda (*Deep Sleep*) com envios a cada 1 hora. O modo *Deep Sleep* reduz o consumo para níveis de microampères (μA), devido ao desligamento de

quase todos os subsistemas do microcontrolador e rádio durante períodos sem medição, preservando apenas o *Real Time Clock* (RTC) para o despertar programado (Wu; Liebeherr, 2023; Ragnoli *et al.*, 2025).

RESULTADOS

O sistema de monitoramento desenvolvido tem operado de forma contínua, realizando medições ininterruptas da temperatura do ar e da umidade relativa. Até o momento, foram coletados dados ao longo de 23 dias, mantendo o sistema ainda em funcionamento. As medições estão sendo realizadas com resolução temporal de 1 hora, utilizando regime de hibernação profunda entre as aquisições. Durante todo o período de monitoramento, a unidade operou de forma estável, sem ocorrência de travamentos ou perda de conexão (Figura 2).

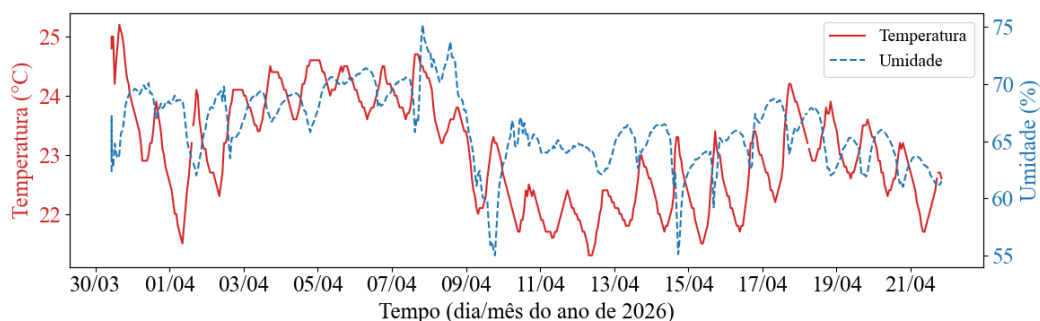


Figura 2: Validação telemétrica do sistema de monitoramento operando em regime de máxima eficiência energética (Hibernação profunda com $\Delta t = 1$ h). O gráfico apresenta o histórico do ao longo de 23 dias de operação.

Análise do alcance de comunicação em campo

Os ensaios realizados em condição NLoS evidenciaram um alcance médio de apenas 8,97 m $\pm$ 2,84 m com a utilização da antena *stub* (Figura 3a) e de 98,14 m $\pm$ 24,03 m com a antena de fibra de vidro de 8 dBi (Figura 3b). Nessas condições, o uso da antena de maior ganho resultou em um aumento de aproximadamente 11 vezes no alcance médio em comparação com a antena *stub* de pequeno porte (Figura 1).

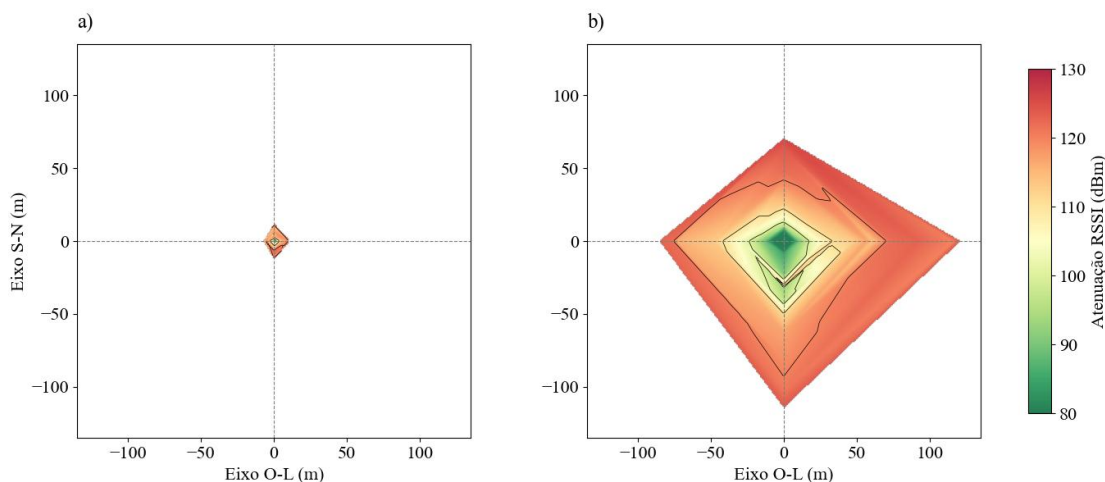


Figura 3: Propagação de sinal LoRa sob condição NLoS. Desempenho do sistema com a) a antena *stub* de 3 dBi e com b) a antena de fibra de vidro de 6 dBi. A gradação de cores representa a intensidade do sinal (RSSI) em dBm, ilustrando a atenuação radial a partir do ponto central de transmissão.

Nos ensaios em que as antenas foram posicionadas em regime LoS foi observado um aumento médio de 6 vezes no alcance de comunicação ao substituir a antena *stub* pela antena de fibra de vidro. De forma semelhante aos ensaios realizados em condição NLoS, a antena de fibra de vidro (Figura 4b) apresentou alcance aproximadamente 7 vezes superior em relação à antena *stub* (Figura 4a), com aumento do alcance de comunicação de $47,24 \text{ m} \pm 6,65 \text{ m}$ para $317,31 \text{ m} \pm 30,92 \text{ m}$.

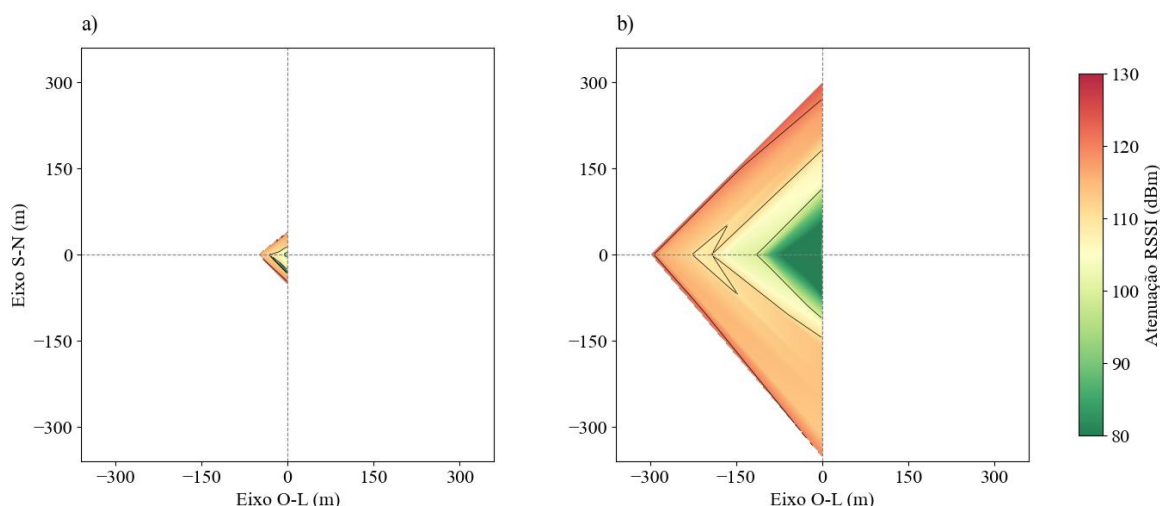


Figura 4: Propagação de sinal LoRa sob condição LoS. Desempenho do sistema com a) a antena *stub* de 3 dBi e com b) a antena de fibra de vidro de 6 dBi. A gradação de cores representa a intensidade do sinal (RSSI) em dBm, ilustrando a atenuação radial a partir do ponto central de transmissão.

Ensaio da autonomia do sistema

A análise dos dados telemétricos, realizada a partir dos testes contínuos com intervalos de aquisição de 1 segundo e 15 minutos, demonstrou que o pack de bateria de Li-Ion de 17600 mAh apresenta um perfil de descarga regido por duas fases termodinâmicas distintas (Figura 5). É possível observar que o sistema manteve um decaimento estável, de comportamento predominantemente linear ($R^2 > 0,80$), até atingir a tensão de inflexão em 4,11 V, quando o decaimento deixa de ser predominantemente linear.

Na fase de platô, quando a tensão varia entre 4,20 V e 4,11 V, os sistemas apresentaram coeficientes angulares em magnitude de $-3,30 \text{ mV/h}$ para aquisições de 1 Hz e $-3,20 \text{ mV/h}$ para aquisição de dados a cada 15 min, indicando uma redução de aproximadamente 3% na queda do coeficiente angular. Ao ultrapassar o limiar crítico de 4,11 V, a célula perde a capacidade de sustentação linear, adentrando na fase de queda. Os testes com resolução de 1 seg e 15 min entram nesta fase após aproximadamente 26 horas e 37 horas, respectivamente. Nesta segunda fase, a voltagem assume decaimento exponencial de 2º grau ($R^2 > 0,99$), refletindo o colapso eletroquímico acelerado da célula. A similaridade das constantes de decaimento nessa fase final em ambos os testes comprova que, independentemente da taxa de envio em modo ativo, o esgotamento até a tensão de corte (3,3 V) apresenta o mesmo comportamento matemático.

Foi observado que, embora o aumento do intervalo de aquisição (de 1 seg para 15 min) em modo ativo tenha gerado um aumento de 10,5% na autonomia total, a implementação do sistema em modo de hibernação profunda e com taxa de aquisição de dados horária resultou em um coeficiente angular 61 vezes inferior ao coeficiente médio observado nos regimes sem hibernação, com valor de $-1,48 \times 10^{-5} \text{ mV/s}$ (Figura 6).

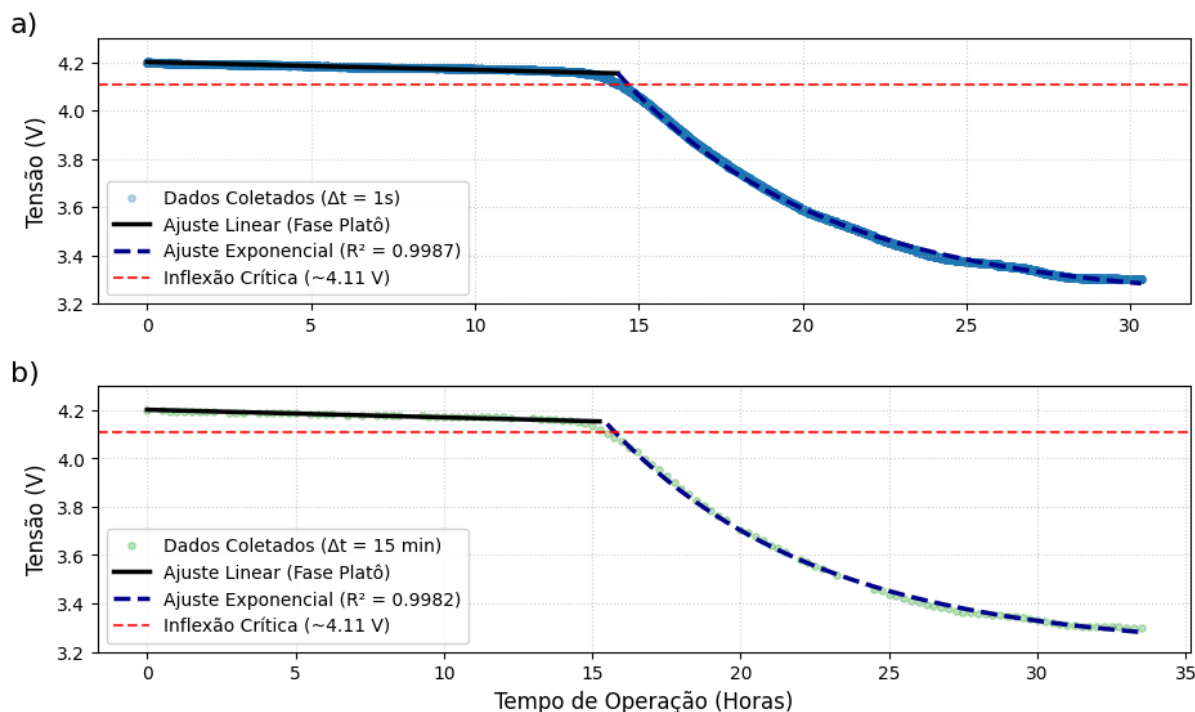


Figura 5: Perfil de descarga mecânica da bateria Li-Ion sob regimes operacionais ativos. a) Comportamento em regime de alta frequência ($\Delta t = 1$ s); b) Comportamento em regime nominal ($\Delta t = 15$ min). As curvas destacam a transição entre a Fase de Platô (ajuste linear) e a Fase de Queda Abrupta (ajuste exponencial decrescente).

Ao extrapolar a taxa experimental de queda observada na primeira fase até o limiar crítico de inflexão (4,11 V), estima-se que o sistema opere por aproximadamente 57 dias até atingir o início da fase de decaimento acentuado, considerando o uso de duas células de Li-Ion em paralelo, com capacidade total de 17.600 mAh. Após esse limite, a bateria entraria na segunda fase de descarga, caracterizada por um decaimento mais rápido da tensão, na qual o sistema apresenta um tempo de operação residual estimado em aproximadamente 17 horas até atingir a tensão de corte (Figura 6).

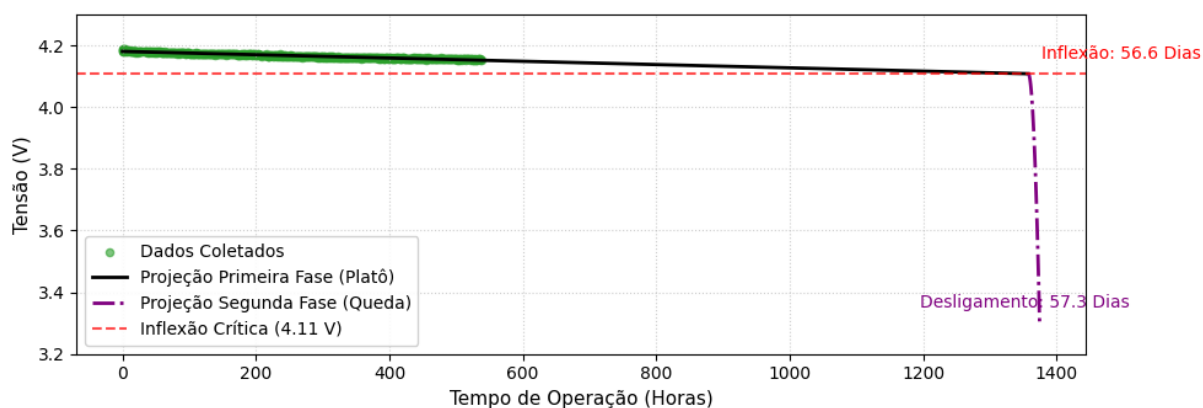


Figura 6: Modelagem preditiva da autonomia do sistema em modo de hibernação profunda com aquisição de dados horária ($\Delta t=1$ h). Integração de dados de tensão da bateria coletados (linha sólida verde) com a extrapolação da primeira fase (decaimento linear) e da segunda fase (decaimento polinomial).

DISCUSSÃO

A transmissão ativa constitui o principal dreno de bateria do sistema. Os testes demonstraram que ampliar o intervalo de aquisição gerou pouco ganho de autonomia (Figura 5). A técnica de hibernação profunda demonstrou ser determinante para a sobrevivência do sistema, aumentando o tempo de autonomia esperado em 41 vezes. Ainda que a literatura corrobore a eficácia deste modo em prolongar a vida útil de sistemas, o esgotamento da bateria não depende exclusivamente da corrente em repouso. O peso computacional e a duração da fase ativa ditam a autonomia final em operações reais (SHINDE *et al.*, 2025). Por exemplo, Wu e Liebeherr (2023) alcançaram anos de operação com pilhas AA ao utilizarem o microcontrolador ATmega328P, cujo consumo computacional é muito inferior ao do ESP32-S3.

De igual modo, os 8 anos de autonomia projetados por Helal *et al.* (2022) fundamentaram-se em parâmetros de baixo consumo computacional, hardware sem módulos de expansão e um tempo ativo de meros 1,7 segundos por hora, condições que, embora validadas em campo, representam uma carga de trabalho inferior à exigida em monitoramentos ambientais complexos. A autonomia projetada para este sistema alinha-se aos dados de alta carga reportados por Ragnoli *et al.* (2025), cujo sistema desenvolvido operaram por apenas três meses. Embora esse estudo utilize baterias LiPo, optou-se aqui por células Li-Ion devido à sua eficiência térmica em ambientes externos. Como ambas as químicas apresentam comportamentos de descarga similares, a discrepância de autonomia em relação a modelos de longa duração não reside na bateria, mas no dreno de corrente do microcontrolador utilizado durante a leitura e envio de dados.

Já para a análise do alcance de comunicação, a topografia revelou-se um limitador crítico. Em condições sem linha de visada, a antena *stub* original perdeu o sinal após 9 metros. Este cenário corrobora os achados de Barbosa *et al.* (2024) na Amazônia e de Loukatos *et al.* (2024) na área rural de um campus universitário em Atenas. Contudo, a substituição por uma antena de fibra de vidro de maior ganho garantiu um alcance aproximadamente 10 vezes superior no mesmo trajeto, evidenciando que essa adequação compensa as atenuações ambientais, indicando que a substituição da antena *stub* no transmissor pode também elevar ainda mais o alcance da comunicação. A arquitetura atingiu sua eficiência máxima em LoS, com a antena de fibra de vidro, alcançando 317 metros. Embora inferior aos 502 metros de Cavilha *et al.* (2023) e aos 3,2 km sobre a água de Helal *et al.* (2022), o desempenho valida a solidez do sistema para coberturas estratégicas. Além disso, as discrepâncias entre os estudos podem ser justificadas pelo cenário de implantação e pelo uso de uma antena *stub* de baixo ganho no transmissor. Ampliações no alcance podem ser feitas com o monitoramento em cascata (*multi-hop*), utilizando nós repetidores para superar obstáculos geográficos.

CONCLUSÃO

De modo geral, a arquitetura unificada Heltec V3 provou ser viável, autônoma e resiliente para o monitoramento remoto, desde que operada sob três pilares fundamentais: uma estratégia de hibernação profunda entre as aquisições de dados; uma gestão preditiva da bateria baseada no limiar crítico e no custo energético do sistema de monitoramento; e o uso de antenas de alto ganho. Para trabalhos futuros, e com o intuito de otimizar ainda mais a eficiência energética, recomenda-se a

expansão do conjunto de baterias de Li-Ion e a integração de micro painéis solares para garantir uma autossuficiência por tempo prolongado. Adicionalmente, no que diz respeito ao alcance e à escalabilidade da rede, sugere-se a elevação do receptor para cotas superiores a 5 metros e o uso contínuo de antenas de 6 dBi ou de ganho superior em ambas as unidades.

AGRADECIMENTOS

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). Maria Eduarda Timos agradece a CAPES pela bolsa de pesquisa – código de financiamento 001. Rafael de Carvalho Bueno agradece a bolsa PDJ do CNPq, processo número 152147/2025-0, chamada número 49/2024. Tobias Bleninger agradece a bolsa de produtividade do CNPq, processo número 313491/2023-2, chamada número 09/2023.

REFERÊNCIAS

- AOSONG ELECTRONICS CO., LTD. **Digital-output relative humidity & temperature sensor/module DHT22 (DHT22 also named as AM2302)**. 2026.
- BARBOSA, B. S. de S. *et al.* Application of Artificial Neural Networks for Prediction of Received Signal Strength Indication and Signal-to-Noise Ratio in Amazonian Wooded Environments. **Sensors**, v. 24, n. 8, p. 2542, 2024.
- CAVILHA, R. Q.; BUENO, R. C.; BLENINGER, T. Sistema de telemetria de baixo custo para monitoramento ambiental. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 26., 2025, Vitória. **Anais [...]**. Porto Alegre: ABRHidro, 2025.
- HELAL, A. A. *et al.* An integrated solution of software and hardware for environmental monitoring. **Internet of Things**, v. 19, p. 100518, 2022.
- KAUR, G.; BALYAN, V.; GUPTA, S. H. Experimental analysis of low-duty cycle campus deployed IoT network using LoRa technology. **Results in Engineering**, v. 23, p. 102844, 2024.
- LOUKATOS, D. *et al.* Implementation and Evaluation of a Low-Cost Measurement Platform over LoRa and Applicability for Soil Monitoring. **Future Internet**, v. 16, p. 443, 2024.
- RAGNOLI, M. *et al.* Energy-Optimized Monitoring System for Underground Cave Environments Based on Long Preamble LoRa. **IEEE Access**, v. 13, 2025.
- SHINDE, U. G. *et al.* Task-Specific Energy Profiling for Microcontroller Selection in Energy-Autonomous Wireless Sensor Nodes. **IEEE Sensors Journal**, 2025.
- VIGULS, J. **RadioLib**: universal wireless communication library for Arduino. Versão 6.6.0. 2024. Disponível em: <https://github.com/jgromes/RadioLib>. Acesso em: 15 nov. 2025.
- WU, D.; LIEBEHERR, J. A Low-Cost Low-Power LoRa Mesh Network for Large-Scale Environmental Sensing. **IEEE Internet of Things Journal**, 2023.