

Sistema de IoT Baseado em LoRa para Monitoramento da Fauna Sul-Mineira

Túlio Augusto de A. Rezende, Murilo Luiz Massini, Samuel B. Mafra e Victoria D. P. Souto

Abstract—This work presents the development and validation of a low-cost national IoT collar prototype for monitoring *Puma concolor*, *Panthera onca*, and *Chrysocyon brachyurus*. The solution is based on the Heltec ESP32 LoRa V2 platform, integrated with DHT11, BH1750, MPU6050, and MAX17043 sensors, with data transmission via LoRa to three distributed gateways. Signal source estimation is based on RSSI values, which are consolidated at a main gateway and sent to the cloud via MQTT. Data visualization was implemented in a Node-RED dashboard. Bench tests confirmed data acquisition, transmission, and end-to-end system integration, demonstrating its feasibility for scalable and low-cost monitoring, with potential application in wildlife management and conservation actions.

Palavras-Chave—IoT; Wildlife monitoring; LoRa.

Resumo—Este trabalho apresenta o desenvolvimento e a validação de um protótipo nacional de coleira de Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) de baixo custo para o monitoramento de *Puma concolor*, *Panthera onca* e *Chrysocyon brachyurus*. A solução baseia-se na plataforma Heltec ESP32 LoRa V2, integrada aos sensores DHT11, BH1750, MPU6050 e MAX17043, com transmissão de dados via LoRa para três gateways distribuídos. A estimativa da origem do sinal fundamenta-se em valores de RSSI, os quais são consolidados em um gateway principal e enviados para a nuvem via MQTT. A visualização dos dados foi implementada em um painel no Node-RED. Testes de bancada confirmaram a aquisição e a transmissão de dados, bem como a integração do sistema de ponta a ponta, demonstrando sua viabilidade para um monitoramento escalável e de baixo custo, com potencial aplicação em ações de manejo e conservação da vida selvagem.

Palavras-Chave—IoT; Monitoramento de fauna; LoRa.

I. Introdução

A conservação da fauna silvestre é fundamental para o equilíbrio ecológico, e a redução populacional de espécies pode gerar impactos ambientais significativos. Nesse contexto, a Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) destaca-se como ferramenta promissora para o monitoramento contínuo de animais e de seus habitats, permitindo a coleta de dados de localização, comportamento e variáveis ambientais, além

de apoiar estratégias como *geofencing* e alertas contra caça ilegal [1].

No sul de Minas Gerais e no Pantanal, o monitoramento de grandes carnívoros, como *Puma concolor*, *Panthera onca* e *Chrysocyon brachyurus*, é especialmente relevante por se tratarem de espécies topo de cadeia e guarda-chuva [2]. O acompanhamento dessas espécies auxilia na compreensão de padrões de movimentação, uso do habitat e dinâmica populacional, subsidiando ações de manejo, conservação e definição de corredores ecológicos [3]. Essa relevância é reforçada por iniciativas como o Projeto Onçaria [4].

Entretanto, as soluções disponíveis são majoritariamente importadas, de alto custo e limitadas em autonomia, resolução temporal e monitoramento ambiental [5]. Além disso, embora amplamente utilizado, o GPS implica maior consumo energético, maior custo e dependência de cobertura satelital [6]. Nesse cenário, a tecnologia LoRa surge como alternativa atrativa para monitoramento regional, por combinar longo alcance e baixo consumo energético. Adicionalmente, o uso de múltiplos gateways e métricas como RSSI permite estimativas aproximadas de localização, adequadas para validação arquitetural e análises preliminares de movimentação [7].

Diante desse contexto, este trabalho propõe e valida uma arquitetura IoT nacional, de baixo custo e baixo consumo energético, voltada ao monitoramento de fauna silvestre. As contribuições concentram-se em: i) uma solução integrada para aquisição e transmissão remota de dados ambientais e de movimento; ii) a avaliação da tecnologia LoRa em áreas extensas com restrições energéticas; e iii) a investigação do uso de múltiplos gateways e medidas de RSSI como suporte à estimativa aproximada de localização. O trabalho também apresenta uma infraestrutura de visualização remota dos dados, evidenciando a viabilidade de uma solução ponta a ponta adaptada ao contexto brasileiro. Os resultados obtidos em ambiente de bancada/laboratório demonstram o potencial da arquitetura proposta como base para futuras validações em campo e aplicações em estratégias de conservação da fauna.

II. Metodologia de Projeto

Este projeto tem como objetivo desenvolver uma coleira IoT para monitoramento de animais silvestres,

capaz de estimar localização, coletar variáveis ambientais e comportamentais e monitorar o nível de bateria. A metodologia adotada foi estruturada em etapas sucessivas, incluindo definição de requisitos, seleção das variáveis de monitoramento, integração de *hardware* (HW) e *software* (SW), implementação da arquitetura de comunicação e validação do protótipo. Ao final, foram realizados testes para verificar a consistência da aquisição, transmissão, armazenamento e visualização dos dados.

- **Definição das Variáveis de Monitoramento:** Foram consideradas quatro classes de variáveis: localização, ambientais, comportamentais e energia. A localização permite analisar padrões de movimentação e uso do *habitat*; as variáveis ambientais, como temperatura, umidade e luminosidade, caracterizam as condições do meio; as variáveis comportamentais, obtidas por dados de movimento, permitem inferir atividade e repouso; e o nível de bateria possibilita avaliar a autonomia do sistema e reduzir falhas operacionais.

- **Integração dos Componentes de HW e SW:** A arquitetura foi projetada com foco em baixo custo, baixo consumo energético e integração funcional. O protótipo utiliza o *Heltec ESP32 LoRa V2*, ao qual foram integrados os sensores *DHT11* para temperatura e umidade, *BH1750* para luminosidade, *MPU6050* para monitoramento de movimento e *MAX17043* para estimativa do estado de carga da bateria. A alimentação é realizada por uma bateria *LS20*. No nível de *software*, o sistema foi organizado em módulos de aquisição, transmissão, armazenamento, processamento e visualização. O *firmware*, desenvolvido na Arduino IDE, realiza a leitura dos sensores, o empacotamento dos dados e a transmissão via LoRa.

- **Estimativa de Posição via RSSI:** A infraestrutura de recepção é composta por três *gateways* baseados em *Heltec ESP32 LoRa V2*. Cada *gateway* recebe os pacotes LoRa e extrai o valor de RSSI. Os *gateways* secundários encaminham essas medições ao *gateway* principal, que concentra as informações e realiza uma estimativa aproximada da origem do sinal. Embora não forneça alta precisão, essa abordagem apresenta baixo custo e baixo consumo energético.

- **Nuvem e Visualização:** O *gateway* principal publica os dados agregados na nuvem por meio do protocolo MQTT. As informações incluem as variáveis monitoradas e os parâmetros de recepção dos sinais. Para acompanhamento remoto, foi implementado um *dashboard* na plataforma Node-RED, capaz de exibir, em tempo quase real, as variáveis coletadas e o estado operacional do protótipo.

III. Protótipo Desenvolvido e Resultados Obtidos

O protótipo desenvolvido, ilustrado na Figura 1, consiste em uma coleira baseada na plataforma Hel-

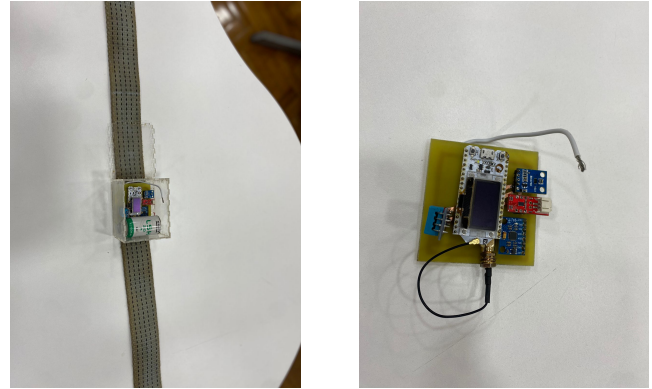


Fig. 1: Protótipo desenvolvido. À esquerda, a coleira instrumentada; à direita, a placa de circuito impresso.

tec ESP32 LoRa V2, integrada aos sensores DHT11, BH1750, MPU6050 e MAX17043, destinados ao monitoramento de temperatura, umidade, luminosidade, movimento e nível de carga da bateria. A alimentação do sistema é realizada por uma bateria LS20. O *firmware*, validado na Arduino IDE, realiza a leitura periódica dos sensores, o empacotamento dos dados e sua transmissão via LoRa.

Para o envio dos dados, foi adotado o protocolo MQTT, utilizando o *broker* público test.mosquitto.org na porta 1883. Cada variável monitorada foi associada a um tópico específico, viabilizando a organização do fluxo de dados e sua integração com as ferramentas de visualização. Foram definidos tópicos para temperatura, umidade, luminosidade, aceleração, giroscópio e estimativas de distância associadas aos pontos de recepção.

A estimativa de posição relativa da coleira foi realizada a partir dos valores de RSSI medidos pelos *gateways* conforme apresentado na Figura 2. Para isso, empregou-se o modelo logarítmico de perda de percurso dado por $d = 10^{(RSSI_0 - RSSI)/10n}$, em que d é a distância estimada, $RSSI_0$ é o valor de referência a 1 m, $RSSI$ é a intensidade do sinal recebido e n é o coeficiente de perda de percurso, adotado como $n = 4$. Embora sujeita a variações ambientais, essa abordagem é adequada para estimativas espaciais preliminares no contexto de validação do protótipo.

```
// ---- Parâmetros de conversão RSSI -> Distância ----
const int  RSSI_0 = -45;
const float n      = 4.0;

float rssiToDistance(int rssi) {
    return pow(10.0, ((float)(RSSI_0 - rssi)) / (10.0 * n));
}
```

Fig. 2: Conversão RSSI-distância.

Após o processamento local, os dados são publicados periodicamente nos tópicos MQTT correspondentes. O *firmware* incorpora verificações de validade por meio

da função `isnan()`, evitando o envio de valores inconsistentes e aumentando a confiabilidade do sistema. A Figura 3 mostra o código responsável por essa etapa.

```
// Distâncias por RSSI
client.publish(MQTT_TOPIC_DIST_GATE2, String(dist1, 2).c_str());
client.publish(MQTT_TOPIC_DIST_GATE3, String(dist2, 2).c_str());
client.publish(MQTT_TOPIC_DIST_PRINCIPAL, String(dist3, 2).c_str());

// Sensores
if (!isnan(temperatura))
    client.publish(MQTT_TOPIC_TEMP, String(temperatura, 2).c_str());

if (!isnan(umidade))
    client.publish(MQTT_TOPIC_HUM, String(umidade, 2).c_str());

if (!isnan(lux))
    client.publish(MQTT_TOPIC_LUX, String(lux, 2).c_str());

if (!isnan(accX))
    client.publish(MQTT_TOPIC_ACC_X, String(accX, 3).c_str());
if (!isnan(accY))
    client.publish(MQTT_TOPIC_ACC_Y, String(accY, 3).c_str());
if (!isnan(accZ))
    client.publish(MQTT_TOPIC_ACC_Z, String(accZ, 3).c_str());

if (!isnan(gyroX))
    client.publish(MQTT_TOPIC_GYRO_X, String(gyroX, 3).c_str());
if (!isnan(gyroY))
    client.publish(MQTT_TOPIC_GYRO_Y, String(gyroY, 3).c_str());
if (!isnan(gyroZ))
    client.publish(MQTT_TOPIC_GYRO_Z, String(gyroZ, 3).c_str());
```

Fig. 3: Publicação dos dados MQTT.

Os testes foram conduzidos em ambiente de banca-laboratório para validar o funcionamento ponta a ponta da arquitetura proposta. Foram verificados: i) a aquisição das variáveis monitoradas; ii) a transmissão via LoRa entre a coleira e os gateways; iii) a obtenção e o encaminhamento dos valores de RSSI; e iv) a publicação e visualização dos dados por meio da infraestrutura MQTT/Node-RED. A Figura 4 apresenta o dashboard desenvolvido para acompanhamento, em tempo quase real, das variáveis monitoradas e do estado da comunicação. Os resultados demonstraram a integração adequada entre sensoriamento, comunicação, processamento e visualização, evidenciando a viabilidade funcional da arquitetura proposta.

A. Estimativa de Custo do Protótipo

A viabilidade econômica da solução foi avaliada a partir do levantamento dos custos dos principais componentes eletrônicos do protótipo. O custo total estimado foi de R\$ 923,42, incluindo Heltec ESP32 LoRa V2 (R\$ 235,00), DHT11 (R\$ 20,00), BH1750 (R\$ 18,52), MPU6050 (R\$ 20,80), MAX17043 (R\$ 49,50) e bateria LS20 (R\$ 579,60). Observa-se que a bateria representa a maior parcela do custo total. Ainda assim, a solução proposta apresenta potencial como alternativa nacional de menor custo em comparação a dispositivos comerciais importados, mantendo capacidade de aquisição, transmissão e visualização das variáveis monitoradas.

IV. Conclusões

Este trabalho apresentou a validação, em banca, de uma coleira IoT nacional para monitoramento de

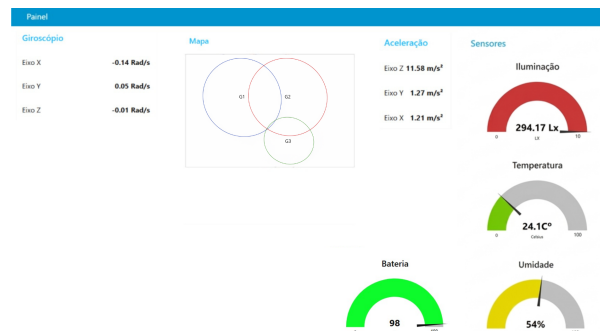


Fig. 4: Dashboard Node-RED.

fauna, baseada em LoRa, múltiplos gateways e RSSI para estimativa aproximada de posição. A solução integrou sensoriamento, transmissão, publicação em nuvem e visualização remota, demonstrando viabilidade funcional e potencial como alternativa nacional de baixo custo. Como trabalhos futuros, destacam-se a miniaturização do dispositivo, o aumento da eficiência energética, o encapsulamento para uso externo e a ampliação da cobertura, incluindo LoRa via satélite.

Agradecimentos

Os seguintes projetos de pesquisa financiaram este trabalho: Projeto Brasil 6G com apoio da RNP/MCTI (01245.020548/2021-07), Projetos xGMobile código XGM-AFCCT-2024-4-1-1 e XGM-AFCCT-2026-4-1-1 com recursos da EMBRAPII/MCTI (Processo 052/2023 PPI IoT/Manufatura 4.0 e FAPEMIG PPE-00124-23); FAPEMIG (APQ-04523-23, BIS-00529-25, APQ-05305-23, APQ-01558-24, RED-00194-23); CNPq (305021/2021-4, 443974/2024-1, INCT STREAM 409179/2024-8).

Referências

- [1] D. Zeuss et al., "Nature 4.0: A networked sensor system for integrated biodiversity monitoring," *Global Change Biology*, vol. 30, no. 1, p. e17056, Jan. 2024.
- [2] D. Thornton, L. C. Zeller, E. Rondinini, R. Boitani, K. A. Crooks, A. Burdett, A. Rabinowitz, and M. Quigley, "Assessing the umbrella value of a range-wide conservation network for jaguars (*Panthera onca*)," *Ecological Applications*, vol. 26, no. 4, pp. 1112–1124, 2016.
- [3] L. Cullen Jr., J. C. Stanton, F. S. Lima, A. Uezu, R. Akçakaya, and D. S. Maehr, "Implications of fine-grained habitat fragmentation and road mortality for jaguar conservation in the atlantic forest, brazil," *PLOS ONE*, vol. 11, no. 12, p. e0167372, Dec. 2016.
- [4] Oncafari, "Oncafari yearly report 2019," 2020, accessed: 2026-02-25. [Online]. Available: https://oncafari.org/wp-content/uploads/2020/10/Oncafari_Yearly_Report_2019_us.pdf
- [5] A. d. N. Carvalho, Ø. Wiig, G. L. d. Oliveira, H. C. Oliveira, L. Sena, R. G. Morato, K. M. P. M. B. d. Ferraz, and A. C. Mendes-Oliveira, "How large felids of south america are influenced by environmental and anthropogenic variables in the most degraded portion of the amazon," *Austral Ecology*, vol. 49, no. 10, 2024.
- [6] H.-I. Kim and K.-D. Park, "Satellite positioning accuracy improvement in urban canyons through a new weight model utilizing gps signal strength variability," *Sensors*, vol. 25, p. 4678, 2025.
- [7] H. Ruan, P. Sun, Y. Dong, H. Tahaei, and Z. Fang, "An overview of LoRa localization technologies," *Computers, Materials and Continua*, vol. 82, no. 2, pp. 1645–1680, 2025.