

Localização em LoRaWAN com Gateway Móvel: Avaliação Experimental em Cenários Reais

Afonso Januário Pujoni Soares e Daniel Costa Ramos

Resumo— Este artigo apresenta uma abordagem de localização LoRaWAN baseada em RSSI utilizando um *gateway* móvel para emular múltiplas âncoras em regiões sem infraestrutura. Experimentos foram realizados em três cenários urbanos reais. O método combina modelo Log-Normal e multilateração por mínimos quadrados. Foram avaliadas técnicas de pré-processamento do RSSI, incluindo média, mediana, IQR e ponderação por SNR. Os resultados mostram que o pré-processamento influencia a acurácia conforme o ambiente. Além disso, o número e a geometria das posições do *gateway* impactam o desempenho. A abordagem proposta oferece uma solução prática e de baixo custo.

Palavras-Chave— LoRaWAN, localização baseada em RSSI, *gateway* móvel, multilateração, LPWAN, Internet das Coisas.

Abstract— This paper presents a LoRaWAN-based localization approach using RSSI measurements and a mobile gateway to emulate multiple anchors in areas without infrastructure. Experiments were conducted in three real urban scenarios. The method combines a Log-Normal propagation model with least-squares multilateration. Different RSSI preprocessing techniques, including mean, median, IQR filtering, and SNR weighting, were evaluated. Results show that preprocessing significantly affects accuracy depending on the environment. Additionally, both the number and geometry of gateway positions influence performance. The proposed approach provides a low-cost and practical solution for LoRaWAN-based localization.

Keywords— LoRaWAN, RSSI-based localization, mobile gateway, multilateration, LPWAN, Internet of Things.

I. INTRODUÇÃO

A crescente adoção de aplicações de IoT e o avanço da robótica móvel têm impulsionado o uso de tecnologias LPWAN, como LoRa/LoRaWAN, que oferecem comunicação de longo alcance com baixo consumo energético. Nesse contexto, a utilização da tecnologia LoRa para localização tem ganhado destaque como uma alternativa viável aos sistemas baseados em GNSS, especialmente para o rastreamento e a navegação de robôs em ambientes urbanos ou internos, onde os sinais convencionais de satélite apresentam severas limitações de precisão e cobertura [1].

Dentre essas abordagens, métodos baseados no indicador de intensidade de sinal recebido (do inglês *Received Signal Strength Indicator* - RSSI) são amplamente utilizados devido à simplicidade de implementação e ao baixo custo

computacional. No entanto, a utilização do RSSI apresenta desafios significativos, uma vez que o sinal é fortemente influenciado por efeitos de propagação, como multipercursos, obstruções e interferência, especialmente em ambientes urbanos e sem linha de visada (NLOS) [2].

Diversos trabalhos têm buscado mitigar essas limitações por meio do uso de técnicas de filtragem e modelagem do canal. Filtros como média, mediana e abordagens mais sofisticadas, como filtros de Kalman, têm sido utilizados para reduzir a flutuação do RSSI e melhorar a estimativa de distância [3], [4]. Métricas complementares, como a relação sinal-ruído (SNR), têm sido exploradas para aumentar a robustez das estimativas [5].

Outra limitação importante dos sistemas de localização baseados em LoRa está relacionada à necessidade de infraestrutura distribuída espacialmente para viabilizar técnicas como trilateração ou multilateração. Em cenários reais, especialmente em regiões sem redes LoRaWAN instaladas, o custo e a complexidade de implantação tornam-se fatores limitantes [6], [7].

Nesse contexto, o presente estudo introduz uma proposta experimental de geolocalização fundamentada no indicador RSSI, empregando um único *gateway* móvel para emular a função de diversos *gateways* em locais sem rede instalada. Essa estratégia não apenas reduz os investimentos necessários para implantação, como também garante flexibilidade na coleta de sinais em diferentes disposições espaciais ao redor do nó alvo.

Adicionalmente este trabalho investiga a influência de diferentes técnicas de pré-processamento do RSSI na acurácia da localização utilizando métodos de mínimos quadrados.

As principais contribuições deste trabalho são:

- proposição de uma abordagem de localização baseada em *gateway* móvel para ambientes sem infraestrutura LoRaWAN fixa;
- avaliação do pré-processamento utilizando média, mediana, filtragem por intervalo interquartil (IQR) e ponderação baseada em SNR, visando o refinamento da precisão posicional para níveis adequados às aplicações de robótica móvel;
- análise da influência do número e da geometria das posições do *gateway* na precisão do método;
- validação prática do método em três cenários reais distintos, representativos de ambientes urbanos típicos e desafiadores para a operação de robôs.

Afonso J. P. Soares, Daniel C. Ramos, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Patos de Minas – MG, e-mails: afonso.pujoni@ufu.br; danielramos@ufu.br. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A localização de dispositivos em redes IoT tem sido amplamente investigada na literatura, especialmente no contexto de redes LPWAN, como LoRaWAN, devido à sua capacidade de comunicação de longo alcance com baixo consumo energético. No entanto, a obtenção de informações de localização sem o uso de sistemas GNSS ainda representa um desafio significativo, principalmente em cenários com restrições de custo, energia e infraestrutura [8].

Diversas abordagens de localização têm sido propostas, incluindo métodos baseados em alcance, como RSSI, ToA e AoA, e métodos livres de alcance baseados em conectividade. Entre eles, os métodos baseados em RSSI se destacam pela simplicidade e baixo custo, embora sejam sensíveis à variabilidade do canal [9].

Em redes LoRa, muitos trabalhos utilizam múltiplos *gateways* fixos para viabilizar a localização. Alternativamente, abordagens recentes exploram o uso de um único *gateway* móvel para reduzir custos, como em Islam et al., que combinam filtragem de partículas e aprendizado de máquina com pseudo-trilateração baseada em RSSI [10].

Técnicas de aprendizado de máquina também têm sido exploradas para melhorar a localização baseada em RSSI, como em Janssen et al., que mostram que métodos como *Random Forest* e *k-NN* podem atingir erros da ordem de centenas de metros, dependendo do ambiente [11].

Outras abordagens utilizam técnicas de otimização e algoritmos bio-inspirados para melhorar a seleção de âncoras e reduzir o erro de localização, como o método de Sankaranarayanan et al., que combina *Crow Search* e centroides ponderados [12].

Métodos baseados em *ranging* com LoRa também têm sido investigados, como em Müller et al., que alcançam erros de dezenas de metros em cenários *outdoor*, porém com dependência de hardware e configurações específicas [13].

Apesar dos avanços, muitos métodos ainda dependem de múltiplos *gateways*, infraestrutura prévia ou alto custo de coleta e *hardware* especializado. Assim, há uma lacuna em soluções de baixo custo e independentes de infraestrutura. Este trabalho aborda esse problema ao propor uma abordagem baseada em *gateway* móvel e filtragem de RSSI, avaliando diferentes estratégias de pré-processamento.

III. MODELAGEM E PROCESSAMENTO DOS DADOS

Esta seção detalha as etapas fundamentais para a estimativa de posição, descrevendo o modelo de propagação Log-Normal adotado, a resolução espacial por meio da multilateração e as técnicas de pré-processamento aplicadas aos dados de sinal.

A. Modelo de Propagação Log-Normal de perda de percurso

A relação entre a potência do sinal recebido e a distância foi modelada utilizando o modelo Log-Normal de perda de percurso, amplamente empregado na literatura para descrever os efeitos de propagação em ambientes reais, incluindo o sombreamento causado por obstáculos [14].

O modelo é dado por:

$$RSSI(d) = A - 10n\log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (1)$$

onde $RSSI(d)$ representa o valor do sinal recebido em dBm a uma distância d , A é o valor médio do RSSI na distância de referência d_0 , n é o expoente de perda de percurso, e X_σ é uma variável aleatória que modela o efeito de sombreamento, assumida como uma distribuição normal com média zero e variância σ^2 , isto é, $X_\sigma \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

Neste trabalho, foi adotada uma distância de referência $d_0 = 30$ m, definida com base na faixa de distâncias amostradas. Essa escolha evita a região de proximidade do transmissor, onde o comportamento do sinal é mais instável, e contribui para maior robustez no ajuste do modelo Log-Normal.

Os parâmetros A e n foram estimados para cada cenário por meio de regressão linear utilizando o método dos mínimos quadrados ordinários (OLS), a partir dos dados experimentais coletados, considerando todas as amostras disponíveis, sem agregação prévia, permitindo capturar a instabilidade do canal.

Os parâmetros estimados apresentam coerência com valores reportados na literatura, especialmente quanto ao expoente de perda de percurso, que se encontra dentro da faixa típica de ambientes urbanos [14]. Estudos recentes demonstram que o modelo Log-Distância, assim como o aqui utilizado, fornece estimativas representativas e aderentes a dados experimentais em cenários urbanos [15].

B. Multilateração por Mínimos Quadrados

A posição do nó transmissor foi estimada a partir das distâncias obtidas via RSSI, utilizando um método de multilateração. Considerando N posições distintas do *gateway*, o problema consiste em estimar a posição (x, y) do nó a partir das distâncias estimadas d_i .

O problema é formulado como uma minimização não linear, dada por:

$$\min_{x,y} \sum_{i=1}^N (\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - d_i)^2, \quad (2)$$

onde (x, y) representam as posições do *gateway* no sistema de coordenadas local, e d_i as distâncias estimadas a partir do RSSI.

Para a resolução do problema de multilateração, utilizou-se o método dos mínimos quadrados não lineares, uma técnica amplamente validada para a estimação de coordenadas em redes LoRa [7], [13]. Este método busca otimizar a posição final ao minimizar o erro residual entre o conjunto de distâncias estimadas e as respectivas distâncias geométricas em relação aos *gateways*.

C. Pré-processamento do RSSI

Com o objetivo de reduzir o impacto de *outliers* e do canal de propagação, diferentes técnicas de pré-processamento foram aplicadas aos dados de RSSI antes da etapa de estimação de distância. Nessa etapa foram utilizadas: a média aritmética dos valores de RSSI, a mediana, filtragem por intervalo interquartil

(IQR), ponderação baseada em SNR e híbrida, usando a SNR e IQR, por ponto de medição.

No caso da filtragem por IQR, os valores de RSSI foram inicialmente ordenados e utilizados para o cálculo do primeiro quartil ($Q1$) e do terceiro quartil ($Q3$). O intervalo interquartil foi definido como $IQR = Q3 - Q1$, sendo considerados *outliers* os valores fora do intervalo $[Q1 - 1.5 \cdot IQR, Q3 + 1.5 \cdot IQR]$, os quais foram removidos. Esse procedimento foi aplicado individualmente a cada ponto de medição. A média dos valores remanescentes foi então utilizada como estimativa do RSSI, reduzindo a influência de medições atípicas.

Para a abordagem baseada em SNR, os valores de RSSI foram ponderados de acordo com a qualidade do sinal, de modo que medições com maior SNR contribuíssem mais significativamente para o valor agregado utilizado na estimativa de distância.

IV. METODOLOGIA

Esta seção detalha a infraestrutura de hardware e rede estabelecida, a qual serve de base para a estratégia de emulação de múltiplas âncoras por meio de um único *gateway* móvel, permitindo a execução sistemática das campanhas de medição em três cenários urbanos reais.

A. Equipamentos e Configuração do Sistema

O *gateway* LoRaWAN foi implementado utilizando um microcomputador *Raspberry Pi 3 Model B+*, acoplado a uma placa concentradora modelo RD43HAT da fabricante Radioenge, executando o sistema operacional Linux. O sistema foi configurado para operar como *gateway* LoRaWAN multicanal convencional, conectado à internet por meio de um *smartphone* Android atuando como ponto de acesso (*hotspot*) com conexão LTE (4G).

Como servidor de rede foi utilizada a plataforma *The Things Network* (TTN), por se tratar de uma infraestrutura pública amplamente utilizada, o que eliminou a necessidade de configuração de um servidor de rede dedicado. O nó transmissor foi implementado com um módulo de rádio LoRa modelo RD49C, da Radioenge, conectado a uma placa adaptadora (*shield*) compatível com Arduino Uno.

B. Estratégia de Coleta com Gateway Móvel

Foi adotada uma estratégia baseada no uso de um *gateway* móvel, com o objetivo de simular a presença de múltiplos *gateways* distribuídos espacialmente. Os experimentos foram conduzidos em uma área urbana, pouco densa, adjacente a um *campus* universitário, na cidade de Patos de Minas, MG, caracterizada por terreno de baixa declividade.

O ambiente apresenta tráfego significativo de veículos, incluindo automóveis, caminhões e ônibus urbanos, além de circulação de pedestres. Essas características contribuem para um ambiente de propagação complexo, com presença de obstruções, multipercursos e condições de linha de visada e não linha de visada (LOS/NLOS).

O *gateway* foi montado sobre um tripé e deslocado para diferentes posições ao redor do nó transmissor, permanecendo

estacionário em cada ponto durante o período de coleta. Utilizando os parâmetros do modelo ajustado, os níveis de RSSI coletados foram convertidos em distâncias estimadas entre o nó alvo e as posições do *gateway*. Essa etapa reduz a complexidade da localização ao estruturá-la como um problema geométrico baseado em distâncias.

C. Estrutura dos Dados e Integração das Fontes

Os dados utilizados nesse trabalho foram obtidos a partir da integração de medições LoRaWAN (RSSI e SNR) com coordenadas GPS das posições do *gateway*, por meio de sincronização temporal entre os registros.

As informações foram organizadas em um *dataset* estruturado, contendo os seguintes campos: *timestamp*, RSSI, SNR, identificador do ponto de medição, latitude, longitude e distância ao nó transmissor, em um arquivo CSV. A distância foi calculada pela fórmula de *Haversine*, que permite estimar a distância geodésica entre dois pontos na superfície terrestre.

D. Procedimento de Coleta de Dados

As medições foram realizadas em três cenários distintos, conforme ilustrado na Figura 1.

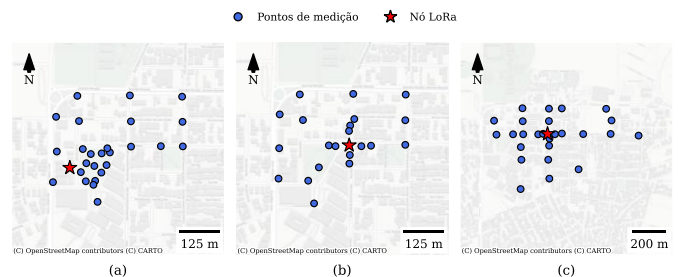


Fig. 1. Distribuição espacial dos pontos de medição e posição do nó LoRa nos três cenários avaliados: (a) Cenário 1, (b) Cenário 2 e (c) Cenário 3. Os marcadores azuis indicam as posições do *gateway* móvel durante a coleta, enquanto a estrela vermelha representa a posição real do nó transmissor.

O nó transmissor foi configurado com parâmetros de camada física LoRa fixos, visando garantir consistência durante as campanhas de medição. O sistema utilizou fator de espalhamento (SF) igual a 8, largura de banda (BW) de 125 kHz e taxa de codificação (CR) de 4/5, operando na faixa de frequência de 915 MHz (padrão ISM para as Américas). Os parâmetros adotados introduzem resiliência ao ruído, sem incorrer no excessivo tempo de transmissão e consumo energético dos SFs mais elevados [8].

O dispositivo operou em modo LoRaWAN Classe A, com ativação do tipo ABP (*Activation By Personalization*) e com o mecanismo de taxa de dados adaptativa (ADR) desativado, de modo a manter os parâmetros de transmissão constantes ao longo dos experimentos. A transmissão utilizou potência padrão (20 dBm) e antenas omnidirecionais de 3 dBi. Os pacotes reduzidos (4 *bytes*), visando maior estabilidade nas medições, foram enviados periodicamente em múltiplos canais.

No Cenário 1, o nó transmissor foi instalado em um edifício de laboratórios da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), posicionado externamente a uma janela no terceiro andar. Nos Cenários 2 e 3, tanto o nó quanto o *gateway* foram posicionados

em ambiente externo, com o *gateway* e o nó montados sobre tripés a aproximadamente 2 m de altura em relação ao solo.

Em cada ponto de medição, o *gateway* permaneceu fixo durante um intervalo de aproximadamente 6 a 7 minutos, recebendo pacotes transmitidos periodicamente pelo nó, sendo as coordenadas geográficas do nó e do *gateway* registradas utilizando o GPS de um *smartphone* Android.

A Tabela I apresenta um resumo dos cenários e das amostras coletadas.

TABELA I. RESUMO DOS CENÁRIOS DE COLETA

Cenário	Nº pontos	Dist_mín (m)	Dist_máx (m)	Total de amostras
1	26	33,1	379,9	958
2	21	28,4	227,3	901
3	26	25,5	516,8	1134

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção avalia o método em três cenários reais, analisando os efeitos do pré-processamento do RSSI e da geometria das posições do *gateway*. A Figura 2 mostra a relação entre RSSI e distância, evidenciando o decaimento com a distância e a alta dispersão nas amostras, devido às características da propagação.

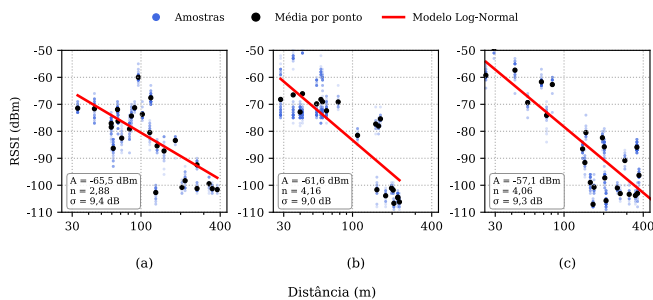


Fig. 2. Relação entre RSSI e distância para os três cenários avaliados: (a) Cenário 1, (b) Cenário 2 e (c) Cenário 3. Pontos azuis representam as amostras coletadas, pretos correspondem às médias por ponto de coleta e a linha vermelha indica o ajuste do modelo Log-Normal de propagação.

A Tabela II especifica os parâmetros estimados do modelo de propagação para cada cenário analisado.

TABELA II. PARÂMETROS ESTIMADOS

Cenário	A (dBm)	n	σ (dB)
1	-65,5	2,88	9,4
2	-61,6	4,16	9,0
3	-57,1	4,06	9,3

A. Influência do pré-processamento do RSSI

Foram avaliadas cinco estratégias de pré-processamento dos dados RSSI: média, média com filtragem por IQR (Intervalo interquartil), mediana, média com ponderação por SNR e média com filtragem por IQR combinada com ponderação por SNR.

A Tabela III resume os resultados das diferentes abordagens de pré-processamento, avaliadas segundo as métricas de erro médio, mediana, percentil 90 (P90) e intervalo de confiança de 95%. Os valores de melhor desempenho para cada cenário encontram-se destacados em negrito.

TABELA III. ERROS OBTIDOS NO PRÉ-PROCESSAMENTO

Cen.	Método	Média (m)	Mediana (m)	P90 (m)	I.C. inf. (m)	I.C. sup. (m)
1	Média	28,74	28,79	29,49	27,57	29,82
	IQR	28,89	28,95	29,75	27,40	30,10
	Mediana	29,42	29,39	30,71	27,63	31,38
	SNR	33,78	33,73	34,74	32,52	35,09
	IQR + SNR	33,94	33,94	35,00	32,28	35,50
2	Média	11,19	11,23	12,53	9,25	12,86
	IQR	11,38	11,19	14,18	7,39	14,99
	Mediana	8,11	8,08	8,80	6,89	9,24
	SNR	11,23	11,23	12,51	9,21	13,41
	IQR + SNR	11,44	11,26	13,64	7,42	14,94
3	Média	39,87	39,89	40,47	38,86	40,94
	IQR	39,16	39,17	39,97	38,06	40,37
	Mediana	39,15	39,28	39,87	37,53	40,49
	SNR	19,86	19,81	21,08	18,04	21,66
	IQR + SNR	20,16	20,14	21,32	18,56	22,20

Os resultados indicam que não existe uma única estratégia de pré-processamento que seja superior em todos os cenários.

No Cenário 1, a utilização da média apresentou o melhor desempenho, sugerindo um ambiente com menor flutuação do sinal e menor influência de *outliers*.

No Cenário 2, a mediana apresentou desempenho significativamente superior, reduzindo o erro médio em relação à média. Esse comportamento indica a presença de *outliers* nos valores de RSSI, os quais impactam negativamente a média, mas são naturalmente mitigados pela mediana.

No Cenário 3, a utilização de ponderação baseada em SNR apresentou a maior melhoria, reduzindo o erro médio de aproximadamente 40 m para cerca de 20 m. Esse resultado evidencia a importância da qualidade do sinal em ambientes mais complexos, caracterizados por efeitos de multipercursos e obstruções.

Embora a análise por IQR tenha indicado maior incidência de valores atípicos no Cenário 3, a aplicação da filtragem não resultou em melhorias significativas no desempenho da localização. Esse resultado sugere que, apesar da presença de *outliers*, o erro é predominantemente influenciado por outros fatores, como a dispersão intrínseca do canal e a qualidade do sinal, evidenciada pelo impacto positivo da ponderação por SNR.

B. Influência do número e da geometria das posições dos gateways

A influência do número de âncoras foi avaliada variando o parâmetro K (número de posições do *gateway*) e comparando duas estratégias de seleção: aleatória e baseada na métrica GDOP (*Geometric Dilution of Precision*). Essa métrica quantifica a qualidade da distribuição geométrica dos pontos de medição, sendo originalmente utilizada em sistemas GNSS para

avaliar a configuração dos satélites em relação ao receptor. Neste trabalho, o conceito é aplicado às posições do *gateway* em relação ao nó transmissor.

Conforme apresentado na Figura 3 o erro diminui com o aumento de K até cerca de 10 a 12 posições, após o qual os ganhos se tornam marginais.

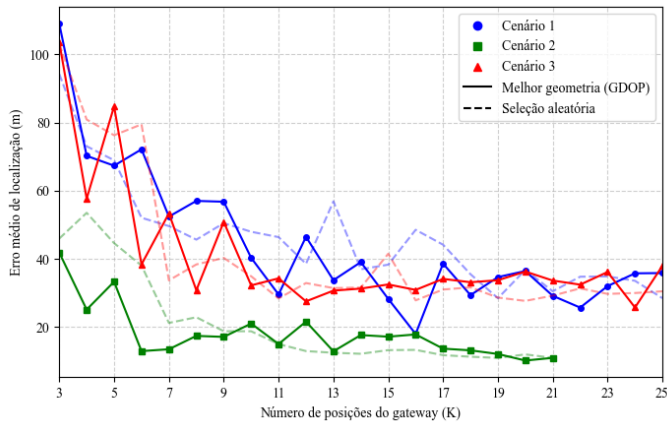


Fig. 3. Erro médio de localização em função do número de posições do *gateway* (K) para três cenários. Marcadores representam diferentes cenários, enquanto linhas contínuas e tracejadas indicam seleção baseada em geometria (GDOP) e seleção aleatória, respectivamente.

Esse comportamento indica a existência de um ponto de saturação, no qual o aumento do número de medições (posições do *gateway*) não resulta em melhorias relevantes na acurácia.

C. Discussão e Comparação com o Estado da Arte

Os resultados obtidos foram comparados com trabalhos da literatura. Em [10], uma abordagem com *gateway* móvel único baseada em filtragem por partículas e aprendizado de máquina apresenta erros entre 20 m e 170 m, valores compatíveis com os observados neste trabalho, mesmo com uma modelagem mais simples.

Kavetha et al. em [1], reportam erros inferiores a 1,2 m, porém em ambiente controlado de pequena escala (20m x 20m) e com múltiplos transmissores fixos, o que limita a comparação direta com os cenários reais avaliados. Uma abordagem que agrupou RSSI, Relação Sinal-Ruído (SNR) e Fator de Espalhamento (SF) em modelos de *Machine Learning* para mapeamento de distância, obteve um erro médio aprimorado de 43,97 metros (26% superior aos sistemas que treinam apenas com RSSI) [6]. Por fim, métodos baseados em vários nós de referência, como em [9], alcançam maior acurácia ao custo de maior infraestrutura.

Assim, a abordagem proposta apresenta um compromisso entre acurácia, custo e simplicidade, sendo adequada para cenários sem infraestrutura.

VI. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs e avaliou uma abordagem experimental de localização LoRaWAN baseada em RSSI utilizando um *gateway* móvel. A principal contribuição do trabalho consiste em determinar parâmetros e estruturar uma metodologia para viabilizar uma infraestrutura de localização voltada para robôs móveis baseada em LoRa. Os resultados

mostram que a geometria das posições do *gateway* e as técnicas de pré-processamento (como a ponderação por SNR) são fundamentais para lidar com as flutuações do sinal. Os experimentos iniciais apontam que existe viabilidade prática para a implementação do sistema, dependendo do cenário de operação. Contudo, fica claro que são necessários mais estudos para melhorar a precisão do método.

Como trabalhos futuros, destacam-se a implementação de um servidor de rede próprio, a investigação de técnicas avançadas de aprendizado de máquina e a automação da coleta com *drones*.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Kavetha, et al. Development of Location Estimation Algorithm Utilizing RSSI for LoRa Positioning System”, *Jurnal Teknologi*, v. 84, n. 1, p. 97–105, nov. 2021, doi: 10.11113/jurnalteknologi.v84.17153.
- [2] L. Aarif, M. Tabaa, e H. Hachimi, “Experimental test and performance of RSSI-based indoor localization in LoRa Networks”, *Procedia Computer Science*, v. 203, p. 420–425, jan. 2022, doi: 10.1016/j.procs.2022.07.055.
- [3] A. Shehni, A. Elzanaty, F. Guidi, A. Guerra, G. Pasolini, e D. Dardari, “Fundamental Limits of Wireless Localization With LoRa Technology”, *IEEE Access*, v. 13, p. 201492–201507, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3635391.
- [4] H. Vo, V. Hoang Long Nguyen, V. L. Tran, F. Ferrero, F.-Y. Lee, e M.-H. Tsai, “Advance Path Loss Model for Distance Estimation Using LoRaWAN Network’s Received Signal Strength Indicator (RSSI)”, *IEEE Access*, v. 12, p. 83205–83216, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3412849.
- [5] M. Khan, S. Aamir, e C. Baris, “Experimental Comparison of SNR and RSSI for LoRa-ESL Based on Machine Clustering and Arithmetic Distribution”, 2022.
- [6] K. Z. Islam, D. Murray, D. Diepeveen, M. G. K. Jones, e F. Sohel, “Machine learning-based LoRa localisation using multiple received signal features”, *IET Wireless Sensor Systems*, v. 13, n. 4, p. 133–150, ago. 2023, doi: 10.1049/wss2.12063.
- [7] H. Kwasmé e S. Ekin, “RSSI-Based Localization Using LoRaWAN Technology”, *IEEE Access*, v. 7, p. 99856–99866, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2929212.
- [8] A. Moradbeikie, A. Keshavarz, H. Rostami, S. Paiva, e S. I. Lopes, “GNSS-Free Outdoor Localization Techniques for Resource-Constrained IoT Architectures: A Literature Review”, *Applied Sciences*, v. 11, n. 22, p. 10793, nov. 2021, doi: 10.3390/app112210793.
- [9] S. J. Bhat e K. V. Santhosh, “Localization of isotropic and anisotropic wireless sensor networks in 2D and 3D fields”, *Telecommun Syst.*, v. 79, n. 2, p. 309–321, fev. 2022, doi: 10.1007/s11235-021-00862-2.
- [10] K. Z. Islam, D. Murray, D. Diepeveen, M. G. K. Jones, e F. Sohel, “LoRa localisation using single mobile gateway”, *Computer Communications*, v. 219, p. 182–193, abr. 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2024.03.012.
- [11] T. Janssen, R. Berkvens, e M. Weyn, “Comparing Machine Learning Algorithms for RSS-Based Localization in LPWAN”, em *Advances on P2P, Parallel, Grid, Cloud and Internet Computing*, v. 96, L. Barolli, P. Hellinckx, e J. Natwichai, Org., em Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 96, Cham: Springer International Publishing, 2020, p. 726–735. doi: 10.1007/978-3-030-33509-0_68.
- [12] S. Sankaranarayanan, et al. “Node Localization Method in Wireless Sensor Networks Using Combined Crow Search and the Weighted Centroid Method”, *Sensors*, v. 24, n. 15, p. 4791, jul. 2024, doi: 10.3390/s24154791.
- [13] P. Muller, H. Stoll, L. Sarperi, e C. Schupbach, “Outdoor Ranging and Positioning based on LoRa Modulation”, em *2021 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*, Tampere, Finland: IEEE, jun. 2021, p. 1–6. doi: 10.1109/ICL-GNSS51451.2021.9452277.
- [14] T. S. Rappaport, *Comunicação sem fio: Princípios e Práticas*. Prentice Hall/SP, 2008.
- [15] S. Andrade, Y. Santos, L. Costa, Á. Medeiros, e M. Ribeiro, “Modelagem da Perda de Percurso em Comunicações de Missões Críticas”, em *Anais do XLIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBt 2025)*, Natal/RN, 2025.