

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO ENLACE LORA EMBARCADO EM SARP: ANÁLISE DE RSSI EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA GPS VISANDO APLICAÇÕES DE COMANDO E CONTROLE

Sara de O. N. Wandermuren Espanhol¹, Henrique Ângelo de Andrade¹, João Pedro de H. Wandermuren Espanhol¹, Danilo Habermann², Glauber da Rocha Balthazar¹

¹Instituto Federal de São Paulo, Câmpus Campinas, Campinas - São Paulo, Brasil
(espanhol.sara@aluno.ifsp.edu.br)

²Coorientador — Exército Brasileiro, Campinas, SP, Brasil

Resumo: Este trabalho apresenta uma avaliação experimental do enlace LoRa a 915 MHz embarcado em um Sistema Aéreo Remotamente Pilotado (SARP), analisando o comportamento do RSSI em função da distância real calculada por GPS. Em continuidade a Espanhol et al. (2025), que identificou obstruções topográficas como principal limitante do enlace terrestre em cenário de Comando e Controle, investigou-se se a elevação do módulo receptor em altitude mitiga tais obstruções. Foram realizadas nove sessões de testes em ambiente urbano e rural, totalizando 1.146 registros, com alcance de até 6.345,8 m sem perda total de enlace — resultado 58% superior ao trabalho base.

Palavras-chave: LoRa; IoT; SARP; Comando e Controle; RSSI

INTRODUÇÃO

Os avanços tecnológicos das últimas décadas têm promovido transformações profundas nos sistemas de defesa, especialmente na integração de tecnologias digitais aos sistemas de informação e comunicações militares. Nesse contexto, o Sistema Militar de Comando e Controle (SISMC²) constitui elemento estruturante da defesa nacional, responsável por integrar e coordenar as atividades das Forças Armadas nos níveis político, estratégico, operacional e tático (Brasil, 2015). Para que o ciclo de Comando e Controle (C²) ocorra de forma eficaz, é indispensável a disponibilidade de informações confiáveis, atualizadas e transmitidas com segurança e oportunidade (Brasil, 2023).

Com a crescente digitalização do campo de batalha, a Internet das Coisas (IoT) emerge como tecnologia habilitadora para a ampliação da consciência situacional e o fortalecimento do processo decisório. A IoT militar fundamenta-se na interconexão de sensores, atuadores e dispositivos embarcados capazes de coletar, transmitir e processar dados em tempo real, permitindo o monitoramento contínuo de

variáveis operacionais relevantes (Gotarane e Raskar, 2019). No âmbito do SISMC², essa tecnologia apresenta potencial para expandir a capacidade de coleta de dados em áreas remotas, melhorar o rastreamento de recursos e otimizar o apoio à decisão em cenários de elevada complexidade (Sokolovic e Markovic, 2023).

Entretanto, a aplicação de IoT em ambientes operacionais terrestres impõe desafios técnicos relevantes, especialmente no que diz respeito ao alcance e à robustez dos enlaces de comunicação em terrenos com infraestrutura limitada ou inexistente (Tortonesi et al., 2016). Nessa direção, a tecnologia LoRa (Long Range) destaca-se por sua capacidade de transmissão de longo alcance com baixo consumo energético, baseada na modulação Chirp Spread Spectrum (CSS), sendo adequada para transmissões periódicas de pequenos pacotes de dados (Sun et al., 2022). O uso de Sistemas Aéreos Remotamente Pilotados (SARPs), como plataformas intermediárias de comunicação, surge como solução complementar para ampliar a cobertura em campo, mitigando obstruções topográficas que limitam os enlaces terrestres (Dambal et al., 2019). Zhang et al. (2020)



demonstraram a viabilidade de enlaces LoRa superiores a 2,5 km com veículos aéreos não tripulados (UAV, do inglês *Unmanned Aerial Vehicle*) como *relay*; Bianco et al. (2022) evidenciaram ganhos expressivos de cobertura com gateways LoRa embarcados em drones.

O presente trabalho constitui continuidade do estudo de Espanhol et al. (2025), que propôs e implementou uma arquitetura IoT-LoRa aplicada ao ambiente de C² militar, avaliando o desempenho do enlace em cenário tático terrestre com viatura blindada como transmissor, em terreno acidentado. Espanhol et al. (2025) identificou correlação negativa moderada entre distância e RSSI ($r = -0,62$) e concluiu que as obstruções topográficas e vegetação são fatores mais críticos para a qualidade do enlace do que a distância em si, com perda total registrada a 2.000 m em razão de obstrução por baixada — porção rebaixada do relevo, situada entre elevações, na qual o transmissor fica abaixo da linha de visada do receptor, comprometendo a propagação do sinal. A hipótese central desta pesquisa é que a elevação do módulo receptor em um SARP mitiga essas obstruções, ampliando significativamente o alcance operacional do sistema. O objetivo geral é avaliar o desempenho da rede IoT baseada em LoRa embarcada em SARP por meio de testes experimentais, analisando o RSSI em função da distância real calculada por GPS em diferentes condições operacionais.

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada consistiu na reprodução, ampliação e avaliação experimental da arquitetura IoT-LoRa embarcada em SARP, em continuidade ao trabalho de Espanhol et al. (2025). Os experimentos foram conduzidos em ambiente urbano e rural em nove sessões distribuídas entre 27 de março e 11 de abril de 2026, totalizando 1.146 registros coletados.

Arquitetura do sistema: o sistema foi composto por um módulo LoRa transmissor acoplado a um veículo automotor móvel e dois receptores fixos: a estação SOLO, posicionada sobre o telhado de uma residência, e a estação DRONE, embarcada em um SARP que operava exclusivamente no eixo vertical — variando altitude sem deslocamento horizontal. Na sessão t11ABR_00, foi introduzida uma terceira

estação, ANTENA1, posicionada em solo como ponto de referência comparativa para avaliação de diferentes configurações de antena.

Configuração dos módulos: foram utilizados módulos WiFi LoRa 32 V2 (Heltec) com os seguintes parâmetros, mantidos constantes em todas as sessões para garantir comparabilidade direta com Espanhol et al. (2025): frequência de 915 MHz (faixa ISM — 902–928 MHz, conforme regulamentação ANATEL), Spreading Factor SF 12, Bandwidth de 125 kHz, Coding Rate 4/5 e potência de transmissão de 20 dBm. O SF 12 maximiza o alcance e a robustez do sinal em detrimento da taxa de transmissão, sendo adequado para transmissões periódicas de pequenos pacotes em ambiente urbano e rural (Sun et al., 2022).

Coleta de dados: os módulos receptores registravam automaticamente, a cada pacote recebido: horário da transmissão, coordenadas GPS (latitude e longitude) do transmissor e o RSSI (em dBm). A distância real foi calculada posteriormente, a partir das coordenadas GPS, por meio de código em Python, e o RSSI expresso em dBm. Os dados eram transmitidos via Wi-Fi para um computador em terra e armazenados em arquivos CSV para posterior análise estatística.

Classificação dos testes: as sessões foram divididas em dois grupos: (a) testes de proximidade (t27MAR_00, t27MAR_01 e t28MAR_01) — distâncias inferiores a 50 m, realizados durante decolagem e calibração, não representativos de condições operacionais de enlace; e (b) testes operacionais (t27MAR_02, t28MAR_00, t02ABR_00, t02ABR_01, t10ABR_00 e t11ABR_00) — distâncias de até 6.345,8 m, representando condições reais de terreno urbano e rural.

Avaliação dos resultados: a principal métrica analisada foi o RSSI (Received Signal Strength Indicator). Para cada combinação de sessão e estação foram calculados: valor médio, máximo, mínimo e desvio padrão. A análise comparativa entre as estações e a relação RSSI $\times$ distância foram realizadas com base nesses indicadores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta as estatísticas consolidadas de RSSI para todos os testes operacionais. Os

testes de proximidade (RSSI entre -27 e -55 dBm, desvio padrão inferior a 3 dBm) refletem exclusivamente a curta separação física entre transmissor e receptor durante decolagem e calibração, não sendo utilizados para inferências sobre o desempenho operacional do enlace.

Teste	Estação	Reg.	Mín (dBm)	Máx (dBm)	σ (dBm)	Dist. máx (m)
t27MAR_02	SOLO	91	-115	-57	17,08	643,8
t27MAR_02	DRONE	113	-113	-62	14,67	731,9
t28MAR_00	SOLO	88	-104	-45	22,42	3.127,7
t28MAR_00	DRONE	88	-114	-62	18,53	3.557,4
t02ABR_00	SOLO	59	-109	-55	20,55	642,4
t02ABR_00	DRONE	59	-119	-57	16,18	642,5
t02ABR_01	SOLO	20	-105	-50	20,28	684,9
t02ABR_01	DRONE	20	-104	-69	11,69	688,9
t10ABR_00	SOLO	35	-108	-48	24,45	743,4
t10ABR_00	DRONE	138	-119	-65	11,14	6.345,8
t11ABR_00	SOLO	29	-106	-48	23,14	880,3
t11ABR_00	DRONE	193	-119	-67	8,19	6.116,2
t11ABR_00	ANTENA1	76	-114	-67	11,59	5.682,8

Tabela 1. Estatísticas de RSSI por teste e estação (testes operacionais).

Nos testes operacionais, os valores de RSSI médio situaram-se entre -73 dBm e -107 dBm, com desvios padrão de até 24,45 dBm, refletindo a variabilidade natural do canal em função da distância e das condições ambientais (Gkotsiopoulos et al., 2021). Em todas as sessões operacionais, o RSSI permaneceu dentro da faixa de recepção dos módulos LoRa utilizados, aproximando-se do limite inferior de sensibilidade em alguns cenários, mas sem ocasionar perda total de enlace, confirmando a viabilidade do enlace em todo o intervalo de distâncias avaliado.

As Figuras 1 e 2 apresentam a relação entre RSSI e distância real (GPS) para os testes operacionais. A Figura 1 reúne os testes de curta distância (até 750 m) e a Figura 2 detalha o teste t10ABR_00, com alcance de até 6.345,8 m. Em conjunto, sintetizam o principal resultado do trabalho: a correlação negativa entre distância e RSSI, a presença do DRONE em distâncias onde o SOLO não tem registros, e a operação contínua do enlace mesmo em condições próximas ao limite de sensibilidade dos módulos LoRa.

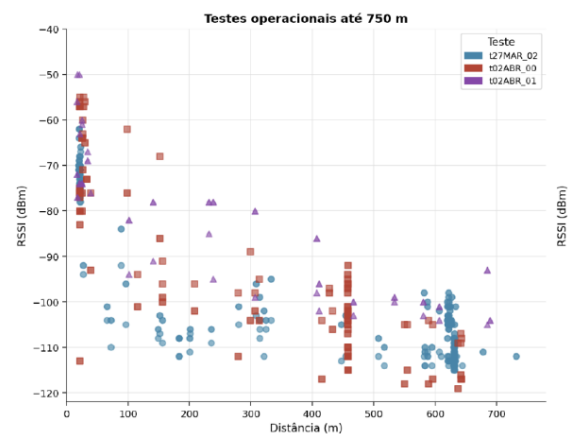


Figura 1. RSSI $\times$ Distância real (GPS) por teste (operacional)

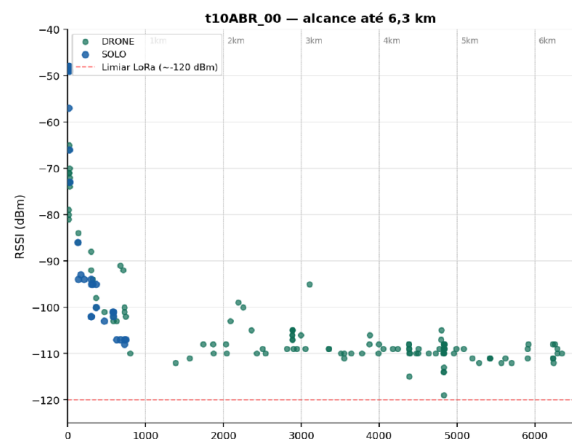


Figura 2. RSSI $\times$ Distância real (GPS) (t10ABR_00)

Na Figura 1, observa-se correlação negativa consistente entre distância e RSSI nos testes t27MAR_02, t02ABR_00 e t02ABR_01: à medida que o veículo transmissor se afasta das estações receptoras, o sinal degrada progressivamente, em comportamento coerente com o modelo de propagação em espaço livre (FSPL) (Sun et al., 2022) e com o achado do



trabalho base ($r = -0,62$). A dispersão ao redor da tendência reflete interferências ambientais e reflexões locais, mais pronunciadas na estação SOLO (σ médio de 21,3 dBm nos testes operacionais) do que na DRONE (σ médio de 13,4 dBm), indicando que a altitude do SARP favorece condições de propagação mais homogêneas (Bianco et al., 2022).

Alcance operacional: a Figura 2 representa o resultado mais expressivo do trabalho. O enlace LoRa-SARP manteve comunicação operacional em distâncias de até 6.345,8 m (t10ABR_00) e 6.116,2 m (t11ABR_00), sem nenhuma perda total de enlace ao longo de todo o percurso. No t10ABR_00, 102 dos 138 registros do DRONE foram obtidos a distâncias superiores a 2.000 m, e 68 a distâncias superiores a 4.000 m, com RSSI médio de -108,86 dBm acima de 2 km — valor ainda operacional. Em contraste, Espanhol et al. (2025) registraram perda total de enlace a 2.000 m por obstrução topográfica, com taxa de erro de 41,94% a 2.500 m e 45,16% a 3.000 m. O presente trabalho superou em 58% o alcance máximo de 4.000 m do trabalho base. Cabe ressaltar que os experimentos foram conduzidos em locais distintos com características ambientais diferentes, o que impede atribuir o ganho exclusivamente à elevação do SARP.

Comparação SOLO vs. DRONE: nos testes t02ABR_00 e t02ABR_01, com distâncias similares entre as estações, as diferenças de RSSI foram em torno de 10 dBm ou inferiores, sugerindo enlace simétrico. Nos testes t10ABR_00 e t11ABR_00, o DRONE apresentou RSSI médio inferior ao SOLO não por pior desempenho, mas porque recebeu 109 e 169 pacotes, respectivamente, que o SOLO não captou — transmitidos a longas distâncias próximas ao limiar de sensibilidade. Analisando apenas os pacotes recebidos simultaneamente, a diferença foi de apenas 6,4 dBm (t10ABR_00) e 4,5 dBm (t11ABR_00). Esse comportamento confirma que o DRONE, por operar em altitude com melhor visada, estende a cobertura para distâncias que a estação terrestre não alcança (Dambal et al., 2019).

Limitações identificadas: (a) Piso de registro do RSSI: o valor mínimo de -119 dBm apareceu em três sessões com distâncias máximas muito distintas (642 m, 6.345 m e 6.116 m), sugerindo possível saturação inferior da biblioteca; os dados nas maiores distâncias devem ser

interpretados com cautela, sendo o enlace operacional sustentado pela recepção efetiva de pacotes, e não pelo valor absoluto de RSSI. (b) Métricas não coletadas: SNR, taxa de entrega de pacotes (PDR) e latência não foram capturadas nos logs, constituindo lacuna para trabalhos futuros. (c) Altitude de voo não controlada: o SARP operou em altitude variável, impedindo a quantificação do ganho em função da altitude. Trabalhos futuros devem realizar testes com altitudes fixas e progressivas — 30 m, 60 m e 100 m — conforme metodologia sugerida por Dambal et al. (2019).

CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou a viabilidade operacional do enlace LoRa-SARP para aplicações de Comando e Controle militar em condições de terreno urbano e rural. Com os mesmos módulos, frequência, parâmetros de configuração e potência do trabalho base (Espanhol et al., 2025), o sistema manteve comunicação operacional em distâncias de até 6.345,8 m, superando em 58% o alcance máximo de 4.000 m do cenário terrestre e sem registrar perda total de enlace dentro do intervalo de distâncias avaliado — enquanto o trabalho base registrou perda total a 2.000 m por obstrução topográfica, com taxas de erro superiores a 40% a partir de 2.500 m.

A correlação negativa entre distância e RSSI, consistente com o modelo FSPL e com os achados de Espanhol et al. (2025) ($r = -0,62$), foi observada em todos os testes operacionais. O DRONE destacou-se na cobertura de registros e na estabilidade do canal a longas distâncias (menor desvio padrão médio: 13,4 dBm vs. 21,3 dBm do SOLO), ao passo que, nas distâncias em que ambas as estações tiveram recepção, o SOLO manteve RSSI comparável ou superior — não havendo penalização da estação terrestre dentro do alcance por ela coberto. A análise dos pacotes recebidos simultaneamente revelou diferença de apenas 4,5–6,4 dBm entre as estações, indicando que a vantagem do SARP reside principalmente na capacidade de manter o enlace a longas distâncias onde a estação terrestre perde cobertura.

Os resultados são consistentes com a hipótese de que a elevação do módulo em altitude mitiga as



obstruções topográficas identificadas como principal limitante no cenário terrestre. Trabalhos futuros devem incluir testes com altitude de voo controlada e progressiva, coleta de métricas complementares (SNR, PDR, latência) e cenários com obstáculos controlados, a fim de quantificar com maior precisão o ganho proporcionado pela plataforma aérea em aplicações de C² militar.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Câmpus Campinas, Exército Brasileiro, seu orientador Glauber da Rocha Balthazar e seus coautores Henrique Ângelo Censi de Andrade e João Pedro de Holanda Wandermuren Espanhol.

REFERÊNCIAS

BIANCO, G. et al. FlyingLoRa: UAV-assisted LoRa networks for data collection in Internet of Things. *Computer Networks*, v. 212, 2022. DOI: 10.1016/j.comnet.2022.109041.

BRASIL. Ministério da Defesa. Política para o Sistema Militar de Comando e Controle – MD31-P-01. 3. ed. Brasília: Ministério da Defesa, 2015.

BRASIL. Exército Brasileiro. Manual de Campanha EB70-MC-10.205: Comando e Controle. 1. ed. Brasília: COTER, 2023.

DAMBAL, G. et al. Improving LoRa signal coverage using UAVs for Internet of Things applications. *Sensors*, v. 19, n. 6, 2019. DOI: 10.3390/s19061348.

ESPAÑHOL, J. P. H. W. et al. IoT no Comando e Controle: análise técnica da transmissão de dados em aplicações militares utilizando microcontrolador WiFi LoRa. XXVII Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa, ITA, São José dos Campos, 2025.

GKOTSIPOULOS, P. et al. Performance Determinants in LoRa Networks: a literature review. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, v. 23, n. 3, p. 1721–1758, 2021.

GOTARANE, V.; RASKAR, S. IoT Practices in Military Applications. *ICOEI* 2019, p. 891–894, 2019.

SOKOLOVIC, V.; MARKOVIC, G. Internet of Things in military applications. *Vojnotehnicki Glasnik*, v. 71, n. 4, p. 1148–1171, 2023.

SUN, Z. et al. Recent Advances in LoRa: a comprehensive survey. *ACM Transactions on Sensor Networks*, v. 18, n. 4, 2022. DOI: 10.1145/3543856.

TORTONESI, M. et al. Leveraging Internet of Things within the military network environment — Challenges and solutions. *IEEE WF-IoT* 2016, p. 111–116, 2016.

ZHANG, M. et al. Drone-Enabled Internet-of-Things Relay for Environmental Monitoring in Remote Areas Without Public Networks. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 7, n. 8, p. 7648–7662, 2020.