

IoT no Comando e Controle: análise técnica da transmissão de dados em aplicações militares utilizando microcontrolador WiFi LoRa

João Pedro HW Espanhol¹, Henrique Ângelo Censi de Andrade¹, Danilo Habermann² e Glauber da Rocha Balthazar¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo e ² Centro Tecnológico do Exército

RESUMO: Para aprimorar a consciência situacional em operações militares, este estudo avaliou o desempenho de módulos LoRa em um cenário tático realista, utilizando uma Viatura Blindada Guarani como transmissor móvel, realizando testes em um trajeto de 500 a 4000 metros entre transmissor e receptor. Os resultados indicam que a topografia e os obstáculos são mais preponderantes para a qualidade do sinal Received Signal Strength Indicator (RSSI) do que a distância ($r = -0.62$). Notavelmente, a perda de pacotes não teve correlação com a distância, porém o ambiente impôs uma taxa de erro geral estatisticamente significativa de 7,87% ($p=0,02$). Conclui-se que o planejamento de redes LoRa terrestres depende criticamente do posicionamento para evitar “zonas de sombra”.

I. INTRODUÇÃO

A comunicação eficiente entre escalões de comando é crucial para operações militares, permitindo decisões baseadas em dados em tempo real (DOICARIU, 2023; JARDIM et al., 2022). No Brasil, o Sistema Militar de Comando e Controle (SISMC²) promove o fluxo de informações e suporte à tomada de decisão (BRASIL, 2015a).

Tecnologias de IoT, como o WiFi LoRa 32 V2 (Heltec), oferecem baixo custo e capacidade de transmissão de dados em tempo real, aprimorando a consciência situacional em ambientes operacionais (GOTARANE et al., 2019; SOKOLOVIĆ et al., 2023). Além de integrar o microcontrolador ESP32 a um módulo LoRa SX1276, essa placa possibilita múltiplas interfaces de comunicação, facilitando a conexão com sensores e atuadores.

Neste trabalho, analisa-se a hipótese de utilização do LoRa como módulo de comunicação em cenários militares, avaliando sua capacidade de transmissão e recepção em diferentes distâncias com apoio de equipamentos terrestres, de modo a contribuir para a manutenção da visão situacional e coordenação entre frações subordinadas (BRASIL, 2015b).

II. MATERIAL E MÉTODOS

Equipamento IoT

Módulo transmissor e receptor: WiFi LoRa 32 V2 (Heltec) (Fig. 1a). Possui microcontrolador *dual-core* de 32 *bits*, memória *flash* de 32 Mb e frequência de operação de 915 mhz.



Figura 1. Equipamentos utilizados: a) WiFi LoRa 32 V2 e b) VBTP-MR Guarani

Protocolo de comunicação

Protocolo de comunicação estruturado nas camadas da aplicação LoRa (Fig. 2) porém customizado para avaliação da qualidade da transmissão por meio da análise de perda de informação no comparativo entre dado enviado e dado recebido. O pacote de dados de usuário foi dividido em seis grupos de mensagens sendo: a) grupo 1: *string* fixa de 12 caracteres; b) grupos 2 a 5: numéricos com cinco, dez, quinze e vinte valores fixos; e c) grupo 6: *string* fixa de sete caracteres.

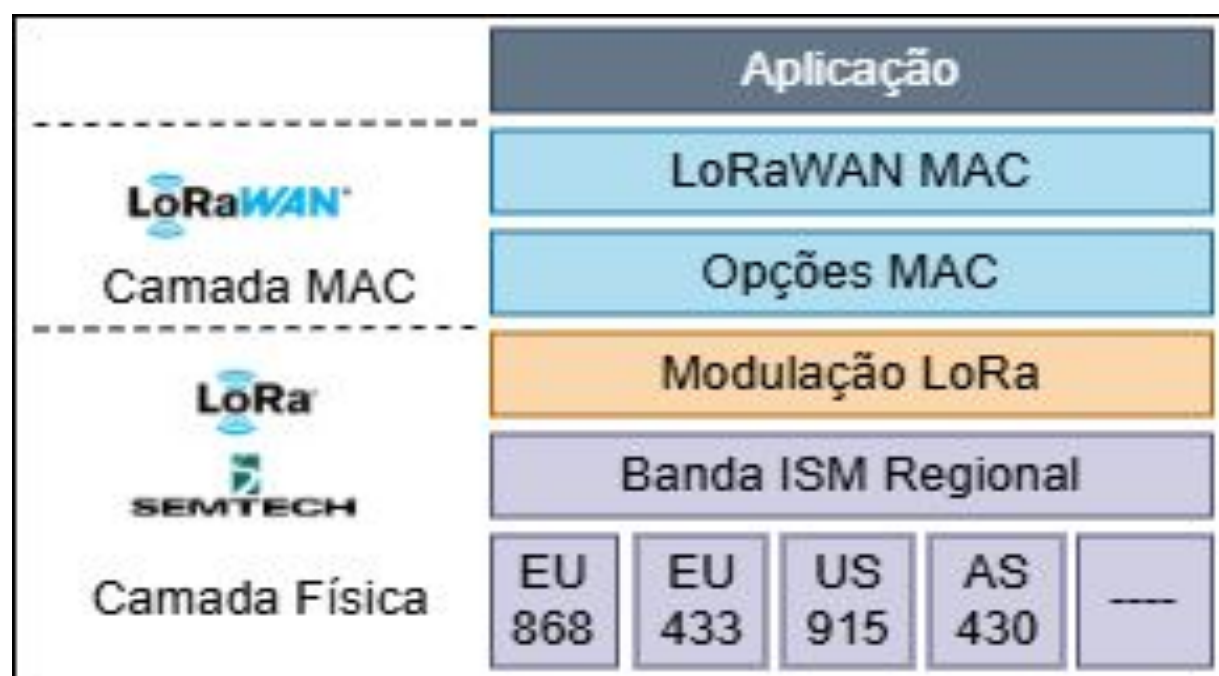


Figura 2. Camadas da rede LoRa

Equipamento militar

Viatura Blindada de Transporte de Pessoal Médio sobre Rodas Guarani (VBTP-MR Guarani) (Fig. 1c). Trata-se de uma viatura mecanizada com proteção balística. Capacidade de transporte para 11 militares; motorização de 383 cavalos com tração 6x6; peso máximo de 25 toneladas em condições de combate.

Planejamento do experimento

Avaliação quantitativa da qualidade de transmissão, realizada por meio da análise da recepção de dados e da validação dos protocolos de comunicação transmitidos e recebidos, em função de distâncias previamente definidas. Considerou-se como sucesso o recebimento íntegro de cada conjunto de mensagens pertencente a cada protocolo; caso contrário, foi classificado como falha.

Métodos avaliativos

Realizada por métodos estatísticos: i) correlação de Pearson (relação entre a distância e a eficiência do sinal produzido); ii) método não paramétrico de comparação de grupos de dados independentes Kruskal-Wallis (avaliou a significância das medianas em relação a eficiência do sinal e dos pacotes enviados pela distância); iii) modelagem de regressão linear pelo método de Ordinary Least Squares (OLS) (avaliou a relação da eficiência do sinal ao longo das distâncias); e iv) Teste Binomial Exato (avaliou a significância da taxa de erro global por pacote transmitido - limite de 5%).

III. RESULTADOS

Cenário de Testes

Dois módulos WiFi LoRa 32 V2 foram utilizados: o transmissor acoplado a uma VBTP-MR Guarani (Fig. 3b) e o receptor em ponto fixo. O programa do transmissor enviava pacotes a cada 3 segundos com mensagens numéricas randômicas, enquanto o receptor permanecia ativo recebendo os dados, ambos sintonizados em 915 MHz e SF 12. O experimento ocorreu na Fazenda Chapadão (11ª Brigada de Infantaria Mecanizada, Campinas-SP), sendo definidos um ponto fixo de recepção (receiver) e oito pontos de transmissão (transmitter) espaçados em 500 m, totalizando 4000 m (Fig. 3a). O terreno apresentou relevo acidentado e arborizado, com elevações entre 617 m e 688 m e inclinações de até 14,8% (subida) e 11,3% (descida), impondo variações significativas de propagação (Fig. 4). O módulo LoRa foi previamente calibrado a 15 m (31 pacotes descartados) e, em cada ponto, transmitidos 31 pacotes para análise.

Análises realizadas

A análise mostrou que a distância tem uma correlação negativa moderada com o RSSI ($r = -0.62$), confirmando que o sinal se enfraquece conforme aumenta a distância, porém, isso não se reflete em pacotes perdidos ou corrompidos ($r = 0.04$). Os testes de Kruskal-Wallis confirmaram que não há diferenças estatisticamente significativas no RSSI ($p = 0.33$) ou na soma de pacotes perdidos/corrompidos ($p = 0.57$) sugerindo que a distância não é um fator crítico para a qualidade da comunicação LoRa nos dados coletados.

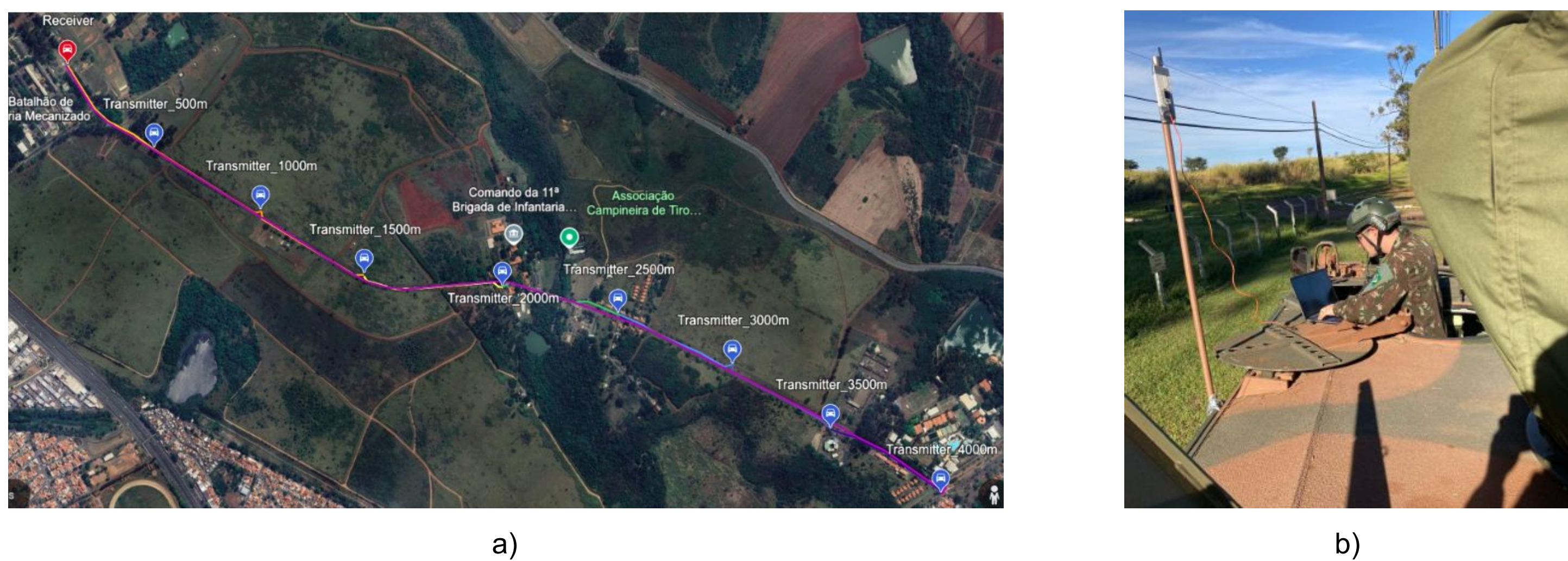


Figura 3. Experimento: a) delineamento dos pontos de transmissão; b) módulo WiFi LoRa 32 V2 acoplado ao VBTP-MR Guarani



Figura 4. Perfil topográfico do experimento

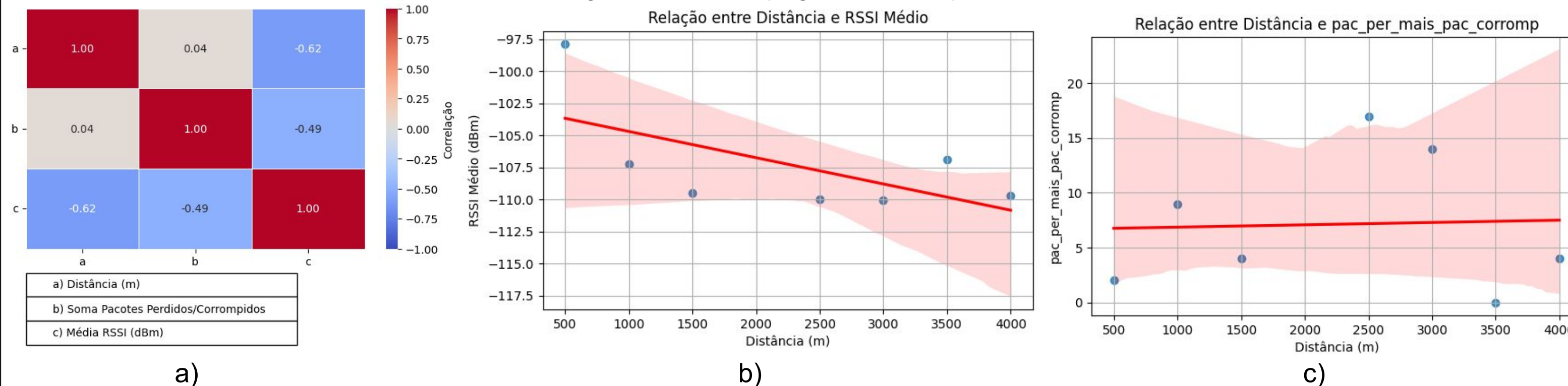


Figura 4. Resultados: a) Correlação; b) OLS da distância e RSSI; c) OLS da distância e somatório pacotes perdidos/corrompidos

A modelagem por OLS entre distância e RSSI (Fig. 4b) mostrou um poder explicativo baixo ($R^2 = 0.38$) com um coeficiente não significativo ($p = 0.14$) indicando que a distância não é um preditor estatisticamente válido para a variação do RSSI com um decréscimo de aproximadamente 0,002 dBm por metro. Em relação a soma de pacotes perdidos e corrompidos (Fig. 4c) confirmou-se que a distância não tem relação estatisticamente significativa ($p = 0.926$, $R^2 = 0.002$).

O Teste Binomial Exato mostrou-se estatisticamente significante na taxa observada (TO) apenas em duas distâncias: 2500 m TO: 41,94%; e 3000 m TO 45,16%. Estas duas distâncias são as de maiores baixadas na topografia do terreno, apresentando maiores arborizações obstruindo e dificultando a comunicação do *transmitter* com o *receiver*. Além disso, o *receiver* não recebeu dados na distância 2000 m (todos os pacotes foram perdidos).

IV. CONCLUSÕES

Distância vs. RSSI Médio: os resultados da correlação de Pearson ($r = -0.62$), do Kruskal-Wallis ($p = 0.33$) e da regressão OLS ($p = 0.14$, $R^2 = 0.38$) mostram uma tendência moderada de queda no RSSI com o aumento da distância sugerindo que embora o sinal enfraqueça com a distância outros fatores influenciam na queda do sinal (0,002 dBm por metro). Comparando a Distância com a Soma de Pacotes Perdidos/Corrompidos, a correlação de Pearson ($r = 0.04$), o Kruskal-Wallis ($p = 0.57$) e a regressão OLS ($p = 0.93$, $R^2 = 0.002$) concordam que não há relação significativa entre a distância e as falhas na transmissão indicando que o LoRa compensa eficientemente a perda de sinal (mesmo em distâncias maiores) e que outros fatores influenciam na perda dos pacotes. O Teste Binomial Exato indicou significância da taxa de erro por pacote apenas nas áreas de baixada.

Conclui-se que as obstruções do ambiente são um impeditivo mais crítico do que a distância para as comunicações LoRa. Essa conclusão corrobora com estudos de soluções que transcendam as barreiras terrestres (TORRES-SANZ et al., 2023; AHMED et al., 2024). O ambiente operacional acidentado revelou que a complexidade topográfica e a vegetação são fatores preponderantes na qualidade do sinal, sobrepondo-se à atenuação sistemática causada pela distância. Este resultado sugere que as obstruções locais e as variações de relevo introduzem uma variabilidade tão elevada que mascara um efeito gradual e linear da distância corroborando com trabalhos correlatos (AZEVEDO et al., 2024).

Do ponto de vista prático, o LoRa se mostra adequado para compor o Nó de Acesso, agregando-se a outros enlaces já presentes nos postos de comando. Embora a interoperabilidade requiera ajustes, sua modulação robusta (CSS) permite operar em ambientes com SNR negativo, mostrando potencial resistência frente à interferência eletromagnética em comparação a rádios VHF tradicionais, ainda que sejam necessários estudos adicionais em cenários operacionais reais. Assim, sua aplicação deve ser entendida como complementar dentro de arquiteturas integradas, reforçando a importância de investigações futuras sobre robustez, interoperabilidade e vulnerabilidade a ataques eletromagnéticos. Além disso, testes exploratórios recentes com drones como repetidores LoRa indicam caminhos promissores para ampliar o alcance em cenários urbanos e de visada obstruída, o que sugere oportunidades para pesquisas complementares nesse campo.

REFERÊNCIAS

- D. Daniel. Emerging and disruptive technology trends in defense and security. The Central And Eastern European Library, Frankfurt, v. 2, n. 1, p. 33-44, 2023..
- J. Rafael; S. M dos; E. Neto; F. Martins; S. Bruna; M. Miguel. Design of a framework of military defense system for governance of geoinformation. Procedia Computer Science, v. 199, p. 174-181, 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.022>.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Política para o Sistema Militar de Comando e Controle - MD31-P-01. 3. ed. Brasília: Ministério da Defesa, 2015a.
- G., Vishal; R., Sandeep. IoT Practices in Military Applications. 2019 3Rd International Conference On Trends In Electronics And Informatics (Icoei), [S.L.], p. 891-894, abr. 2019. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/icoei.2019.8862559>.
- S., Vlada; M., Goran. Internet of Things in military applications. Vojnotehnicki Glasnik, v. 71, n. 4, p. 1148-1171, 2023. Centre for Evaluation in Education and Science. <http://dx.doi.org/10.5937/vojtehg71-46785>.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Política Nacional de Defesa, Estratégia Nacional de Defesa. Brasília: Ministério da Defesa, 2015b.
- TORRES-SANZ, Vicente et al. Analysis of the Influence of Terrain on LoRaWAN-based IoT Deployments. Proceedings Of The Int'L Acm Conference On Modeling Analysis And Simulation Of Wireless And Mobile Systems, [S.L.], p. 217-224, 30 out. 2023. ACM. <http://dx.doi.org/10.1145/3616388.3617530>.
- AHMED, Shahriar et al. Vegetation Effects on LoRa-Based Wireless Sensor Communication for Remote Monitoring of Automatic Orchard Irrigation Status. Iot, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 2, 26 dez. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/iot6010002>.
- AZEVEDO, Joaquim Amândio et al. A Critical Review of the Propagation Models Employed in LoRa Systems. Sensors, [S.L.], v. 24, n. 12, p. 3877, 15 jun. 2024. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/s24123877>.