

Análise de Propagação de Dispositivos LoRa em Ambiente Indoor

Gabriel Nascimento Lira, João Vitor Gadelha Cavalcante Ciraulo, Daniel da Silva Sarmento, Danilo Brito Teixeira de Almeida, Fabrício Braga Soares de Carvalho e Waslon Terllizzie Araújo Lopes

Resumo— Este artigo apresenta uma análise da propagação de sinais de radiofrequência em um ambiente interno de múltiplos andares, com o objetivo de implementar uma rede de sensores sem fio utilizando a tecnologia de longo alcance (*Long Range* – LoRa) para aquisição e monitoramento de parâmetros relevantes. As medições foram realizadas utilizando um par de módulos LoRa, com a avaliação do desempenho da comunicação por meio da análise do indicador de Intensidade do Sinal Recebido (*Received Signal Strength Indicator* – RSSI) e da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR). Os resultados obtidos visam contribuir com a implementação de um *Smart Campus* no Campus I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em João Pessoa, Brasil.

Palavras-Chave— LoRa, IoT, Propagação em Ambiente Interno, Rede de Sensores sem Fio, Múltiplos Andares.

Abstract— This article presents an analysis of radiofrequency signals propagation in a multi-floor indoor environment, aiming to implement a LoRa-based wireless sensor network for the acquisition and monitoring of relevant parameters. The measurements were carried out using a pair of LoRa modules, and the communication performance was evaluated through the analysis of the RSSI and the SNR. The results obtained are intended to support the implementation of a Smart Campus at Campus I of the Federal University of Paraíba (UFPB), in João Pessoa, Brazil.

Keywords— LoRa, IoT, Indoor Propagation, Wireless Sensor Network, Multi-Floor Environment.

I. INTRODUÇÃO

O surgimento de novas tecnologias e aplicações, além de promover um aumento na demanda dos usuários, torna conceitos como Internet das Coisas (*Internet of Things* – IoT) e Cidades Inteligentes (*Smart Cities*) cada vez mais comuns. Além disso, a capacidade de simplificar tarefas cotidianas, como acionamento remoto, monitoramento e controle, aliada à necessidade de uma estrutura física mais versátil e simplificada, aumenta a demanda por dispositivos IoT integrados às redes. Essa, por sua vez, impulsiona o setor de tecnologias da informação e comunicação nos mercados nacionais e internacionais [1], [2].

Por outro lado, a integração de dispositivos sem fio representa uma série de desafios. Por exemplo, a propagação da

onda eletromagnética em ambientes reais é afetada por sua interação com objetos físicos ou com a própria infraestrutura, provocando efeitos como atenuação e sobreamento da potência média do sinal, ou ainda variações rápidas no seu valor instantâneo. Para lidar com esses efeitos, uma boa caracterização do meio se faz necessária, pois torna possível a utilização de técnicas para a melhoria da conectividade, da confiabilidade e da precisão, viabilizando aplicações como automação predial, monitoramento ambiental e localização em tempo real [3].

Diferentes tecnologias podem ser empregadas para implementar redes IoT como ZigBee, Wi-Fi e *Narrowband* IoT, as quais são citadas e aplicadas em contextos diversos [4], [5]. Porém, as principais características da tecnologia LoRa (*Long Range*), especificamente seu baixo consumo de energia, longo alcance e banda estreita, levam a um crescimento na sua utilização. Como consequência, cada vez mais aplicações em ambientes *indoor*, *outdoor* e industriais são observadas [1].

O protocolo de comunicações sem fio LoRa foi desenvolvido pela Semtech Corporation® e promovido pela LoRa Alliance®. Essa tecnologia é projetada para redes de longo alcance e baixo consumo de energia, operando nas faixas de frequência não licenciadas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*). A tecnologia LoRa é baseada em *Chirp Spread Spectrum*, que consiste na codificação de dados usando variações lineares de frequência conhecidas como *chirps* [6].

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é caracterizar um ambiente de propagação *indoor* voltado para as aplicações utilizando a tecnologia LoRa, a partir de medições experimentais na faixa de 433 MHz. Adicionalmente, realiza-se a análise de desempenho do sistema em operação por meio de medições da intensidade do sinal recebido (*Received Signal Strength Indicator* – RSSI) e da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR).

O restante deste artigo está organizado da seguinte maneira: aspectos associados à propagação móvel de radiofrequência são discutidos na Seção II; na Seção III, a metodologia experimental desenvolvida neste trabalho é descrita; enquanto os resultados obtidos são apresentados na Seção IV, sendo o artigo concluído na Seção V.

II. PROPAGAÇÃO MÓVEL DE RADIOFREQUÊNCIA

A diversidade de cenários reais inviabiliza uma caracterização simplificada do ambiente de propagação. Eventos como chuva ou presença de vegetação podem promover uma redução na potência média do sinal recebido, ou sobreamento. Devido à natureza aleatória desse fenômeno, o sobreamento

Gabriel N. Lira, João V. G. Ciraulo, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mails: gabrieln.lira@estudante.cear.ufpb.br, joao.ciraulo@estudante.cear.ufpb.br; Daniel S. Sarmento, Danilo B. T. Almeida, Fabrício B. S. Carvalho, Waslon T. A. Lopes, Grupo de Pesquisa em Comunicações e Processamento de Sinais (GCOMPS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, e-mails: daniel.sarmiento@embrapii.cear.ufpb.br, danilo.almeida@estudante.cear.ufpb.br, fabricio@cear.ufpb.br, waslon@cear.ufpb.br.

é classicamente caracterizado por distribuições como Log normal e Gamma [7]. Além do sombreamento, a onda eletromagnética está sujeita à perda de percurso (*Path-Loss* – PL), caracterizada pela atenuação do sinal à medida que este se propaga no meio.

Apesar de diversos modelos empíricos serem capazes de prever o comportamento da potência recebida em função da distância entre o transmissor e o receptor [8], [9], [10], [11], a escolha adequada do modelo de propagação depende, em geral, das características do ambiente e da frequência de operação do sistema [8].

O modelo Hata-COST231, por exemplo, pode ser utilizado para a caracterização do PL em ambientes urbanos e suburbanos na faixa de frequência entre 1500 e 2000 MHz [9]. Por outro lado, ao incorporar as singularidades do ambiente em análise, o modelo COST231 Multi-Wall, que apresenta uma correção ao modelo de propagação no espaço livre (*Free Space Path-Loss* – FSPL), representa uma alternativa para a caracterização de ambientes *indoor* na faixa de frequência de 400 a 2000 MHz [10].

Apesar de o modelo de predição de perdas COST231 Multi-wall, possibilitar uma boa caracterização a partir dos conhecimentos das estruturas físicas do ambiente, o modelo α - β - γ pode ser empregado para descrever a atenuação do sinal com a distância quando o conhecimento das estruturas físicas do ambiente não está disponível [11].

A transmissão do sinal em uma rede LoRa é influenciada por diversos fenômenos introduzidos pelo ambiente físico, incluindo obstáculos e características topográficas, cujos efeitos podem ser caracterizados por diferentes modelos estatísticos e empíricos. Além disso, interferências e atributos específicos dos transceptores LoRa podem provocar alterações no desempenho da rede. Portanto, neste trabalho, é usado o modelo FSPL, ou modelo de Friis, e o modelo de regressão exponencial para o ajuste dos dados medidos, e avaliada a SNR como medida de desempenho da transmissão utilizando o protocolo LoRa no ambiente caracterizado.

A. Modelo de Propagação no Espaço Livre

O modelo FSPL tem formulação simples capaz de quantificar a atenuação do sinal transmitido assumindo uma transmissão na condição LoS, desconsiderando efeitos como absorção, refração, difração ou reflexão [1]. No FSPL, a potência recebida é determinada pela equação de perdas em espaço livre de Friis, dada por [8]

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L}, \quad (1)$$

em que P_t representa a potência transmitida, $P_r(\cdot)$ é a potência recebida, d representa a distância entre as antenas em metros, λ representa o comprimento de onda em metros, L é o fator de perda do sistema, geralmente atribuído à atenuação da linha de recepção, às perdas de filtro e às perdas da antena no sistema de comunicação, e G_t e G_r referem-se, respectivamente, aos ganhos das antenas transmissora e receptora.

B. Modelos de Regressão

Os modelos de regressão são utilizados para aproximar as perdas de propagação no canal. São modelos bastante versáteis, pois seus parâmetros de ajuste são determinados a partir de dados experimentais obtidos do próprio ambiente em análise. A técnica de estimação dos parâmetros da regressão consiste na minimização do erro entre os valores calculados e os medidos experimentalmente [12].

Neste trabalho, optou-se pela utilização da regressão exponencial, na qual a relação entre a distância e a potência recebida é dada por [1]

$$d_{\text{REX}} = ae^{bS}, \quad (2)$$

em que d_{REX} representa a distância entre o transmissor e o receptor em metros (m) e S é a potência recebida em dBm.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a metodologia experimental desenvolvida para estabelecer a conexão entre os módulos LoRa. Em seguida, é descrito como foi realizada a implementação experimental no ambiente *indoor*; especificamente, um prédio localizado no Campus I da Universidade Federal da Paraíba, na cidade de João Pessoa-PB.

A. Metodologia

Para o estabelecimento da rede LoRa, foram implementados dois módulos: um transmissor e um receptor, com o objetivo de validar a comunicação entre os dispositivos. O módulo de recepção, responsável por receber os dados coletados e armazená-los localmente no dispositivo ao qual estava conectado, foi mantido fixo. O módulo de transmissão, por sua vez, ficava em movimento e era utilizado para registrar e enviar o RSSI.

1) *Módulo de Transmissão*: A unidade transmissora consiste de uma placa de prototipagem eletrônica Arduino UNO e do módulo LoRa. Esta parte do sistema é responsável pela transmissão dos dados, sendo posicionada em diferentes pontos ao longo do prédio, com o objetivo de avaliar o desempenho da rede e o alcance do módulo LoRa. O módulo é alimentado por uma bateria externa. Os dados transmitidos são enviados ao receptor, fixado em um local predeterminado, e então armazenados em um banco de dados.

2) *Módulo de Recepção*: O módulo responsável por receber e registrar os dados de RSSI e SNR é composto por uma combinação da placa de prototipagem eletrônica Arduino UNO e o módulo LoRa. Este módulo é alimentado através de uma conexão USB a um notebook, permitindo a gravação dos dados coletados.

É importante destacar que, nesta fase de testes, os módulos são idênticos em termos de componentes, pois a intenção dos autores não foi obter dados relacionados a sensores ou outras variáveis. Esses elementos podem ser adicionados ao módulo transmissor conforme necessário. A Figura 1 ilustra a montagem do módulo transmissor/receptor.

A metodologia adotada baseou-se no envio de pacotes em intervalos de 5 segundos em cada ponto de transmissão estabelecido. Em cada ponto, foram enviados 50 conjuntos de

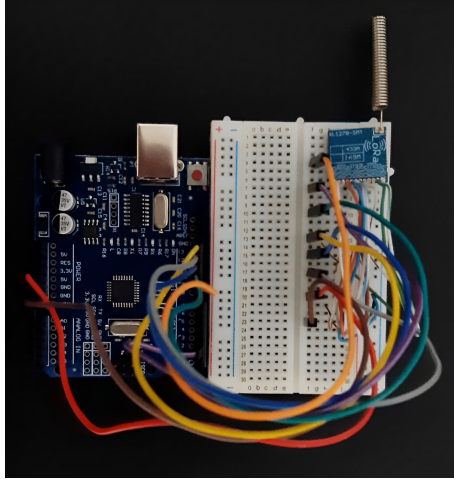


Fig. 1: Módulo transmissor/receptor.

dados do transmissor para o receptor, possibilitando o cálculo das médias dos valores observados. Os pontos de transmissão eram espaçados de 10 metros, verificando-se a conexão entre os módulos e prosseguindo-se até que a conexão fosse perdida.

As medições foram realizadas em um ambiente com obstáculos físicos, com o intuito de observar o comportamento da intensidade do sinal e da SNR para verificar-se a confiabilidade da comunicação em diferentes condições estruturais do prédio.

O valor de RSSI representa a intensidade relativa do sinal captado em um ambiente de comunicação sem fio, normalmente expressa em dBm. O RSSI fornece uma indicação do nível de potência que o rádio receptor detecta após a antena, levando em conta possíveis perdas no cabo.

Os parâmetros de modulação do LoRa usados para esta medição estão descritos na Tabela I. Uma potência de transmissão de 15 dBm foi escolhida para que o sinal tivesse um alcance maior e fosse mais robusto, principalmente em ambientes *indoor* onde há significativa atenuação causada por paredes, móveis e outros obstáculos, apresentando um bom equilíbrio entre desempenho e consumo. O fator de espalhamento adotado foi 12, o maior valor disponível para este parâmetro, garantindo uma maior sensibilidade do receptor e tornando o sistema mais resistente a ruídos e interferências. A largura de banda de 125 kHz, considerada padrão no LoRa, proporciona um bom equilíbrio entre alcance, sensibilidade e taxa de dados. A taxa de codificação empregada foi de 4/5, o que implica em uma pequena sobrecarga de *bits* de correção, preservando a confiabilidade da informação [13]. Por fim, a ativação do CRC (Código de Redundância Cíclica) assegura que apenas os pacotes íntegros sejam considerados válidos, aumentando a confiabilidade do sistema.

B. Ambiente de Testes Experimentais

Para a realização dos testes experimentais, foi escolhido o prédio do Centro de Energias Alternativas e Renováveis (CEAR), localizado no Campus I da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), em João Pessoa-PB.

O edifício onde os testes foram realizados possui uma área total de 4.375,33 m² e altura de 19,8 m, sendo 3,3 m por

TABELA I: Parâmetros da camada física para a configuração de medição.

Parâmetro	Valor
Fator de Espalhamento (<i>Spreading Factor</i>)	12
Largura de Banda do Canal (<i>Signal Bandwidth</i>)	125 kHz
Taxa de Código (<i>Code Rate</i>)	4/5
Canal	433 MHz
CRC do <i>Payload</i>	Ativado
Potência de Transmissão (<i>Tx Power</i>)	15 dBm

andar. A escolha deste ambiente deve-se à sua infraestrutura predominantemente retilínea, com corredores longos e alinhados, o que favorece as medições. Além disso, a presença de obstáculos físicos permite avaliar o desempenho dos módulos em condições mais desafiadoras de propagação de sinal. A Figura 2 apresenta o ambiente interno do prédio utilizado nos experimentos.



Fig. 2: Vista interna do prédio do CEAR/UFPB.

As medições foram iniciadas em áreas com trajeto retilíneo e visada direta, sendo posteriormente realizadas em locais com a presença de obstáculos físicos, como paredes e divisórias. Essa mudança gradativa no ambiente interno foi essencial para monitorar o desempenho dos módulos à medida que eram expostos a diferentes configurações estruturais. As alterações no cenário permitiram avaliar os módulos sob condições operacionais mais diversas e desafiadoras, representando com maior fidelidade as características típicas de ambientes prediais.

IV. RESULTADOS

Nesta seção, são apresentados os resultados dos testes experimentais descritos anteriormente, com uma análise detalhada de cada cenário.

Na Figura 3, são apresentados os pontos de medição ao longo do percurso. O marcador roxo indica a posição do receptor, enquanto o marcador verde indica a posição do transmissor em cada ponto medido. É essencial destacar que a quantidade de pontos de medição foi restrita devido à extensão do prédio em questão.

Por sua vez, na Figura 4, é apresentada a variação do valor de RSSI em função da distância entre os módulos para diferentes andares do prédio. Percebe-se que o comportamento do

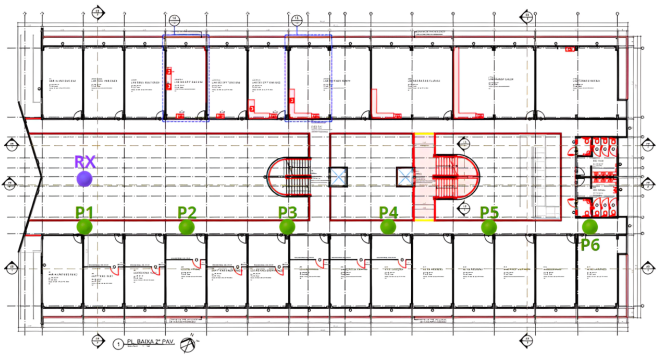


Fig. 3: Pontos de medição – Cenário 1.

sinal sofre interferência considerável da localização vertical, além da distância horizontal. De forma geral, o térreo possui os melhores valores de RSSI, com atenuação relativamente moderada à medida que a distância aumentava. Isso se deve à proximidade com o receptor e ao menor número de obstáculos físicos entre os módulos, contribuindo para a propagação do sinal.

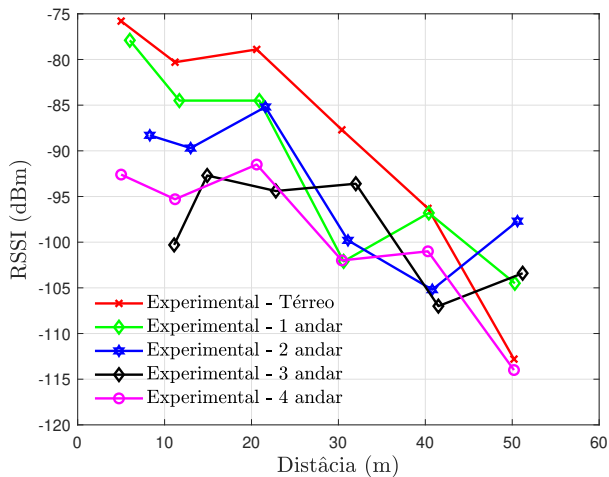


Fig. 4: Comparação entre o RSSI em função da distância para cada andar.

Nos andares superiores (1º ao 4º), os valores de RSSI foram, em geral, reduzidos, demonstrando maior atenuação do sinal. Esse resultado pode ser atribuído à presença de lajes, paredes e outros elementos que existem entre os andares, causando perdas adicionais por absorção. Para as maiores distâncias, são observados os menores valores de RSSI. No quarto andar, por exemplo, o valor desse indicador chega a -114 dBm, caracterizando uma forte atenuação do sinal, contribuindo para um eventual limite de conexão.

As curvas apresentadas nas Figuras 5 a 7 foram obtidas por meio da utilização do Algoritmo de Marquardt-Levenberg [14] para minimização não linear do erro médio quadrático entre os dados experimentais e as curvas de regressão. A Tabela II resume os valores obtidos de erro médio quadrático (%) para os modelos de Friis e regressão exponencial nos andares do prédio e os coeficientes a e b da regressão, conforme a

Equação 2. Nota-se que o modelo de regressão exponencial apresentou melhor desempenho no térreo (27,29%) e no primeiro andar (18,1%), enquanto o modelo de Friis teve menor erro no quarto andar (22,38%). Por outro lado, o pior desempenho foi constatado para o modelo exponencial no terceiro andar (204,2%), o que aponta uma limitação do ajuste exponencial para este caso em específico.

TABELA II: Erro médio quadrático (%) para os modelos testados em cada andar.

Andar	Friis (%)	Exponencial (%)	a	b
Térreo	40,1	27,29	18,64	0,075
1º Andar	31,04	18,10	14,82	0,08
2º Andar	39,99	44,25	10,93	0,12
3º Andar	43,11	204,20	2,61	0,2
4º Andar	22,38	31,13	11,52	0,07

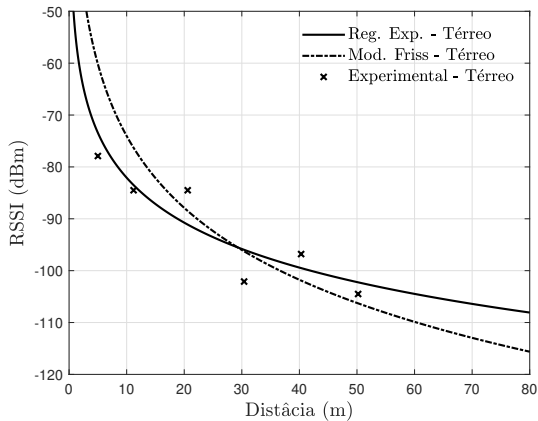


Fig. 5: Potência do sinal recebido em função da distância para o térreo.

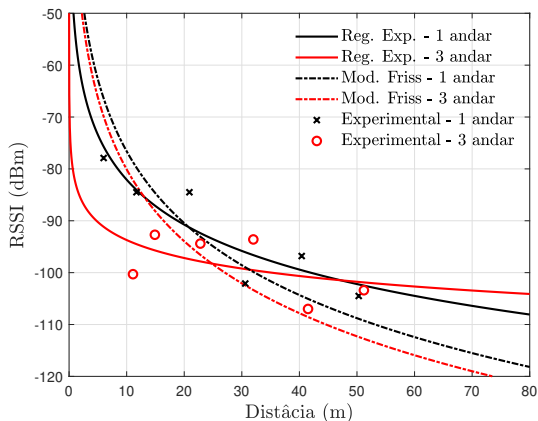


Fig. 6: Potência do sinal recebido em função da distância para o primeiro e terceiro andar.

Na Figura 8 são apresentadas curvas da SNR em função da distância entre os módulos LoRa para os andares do prédio. Observa-se que os valores de SNR se mantêm relativamente estáveis nos primeiros 30 metros, com uma média variando

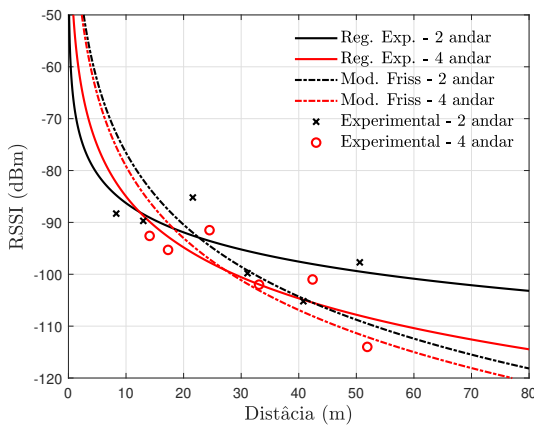


Fig. 7: Potência do sinal recebido em função da distância para o segundo e quarto andar.

entre 10 e 12 dB, apresentando uma boa qualidade de recepção do sinal enviado. Porém, após esse ponto, percebe-se uma queda acentuada na SNR, refletindo os efeitos da distância. Além disso, é observada uma queda abrupta nas últimas medidas do térreo e do quarto andar, podendo estar relacionada às características da estrutura do local. Vale a pena ressaltar que os valores de RSSI também foram menores para esses pontos, conforme apresentado na Figura 4.

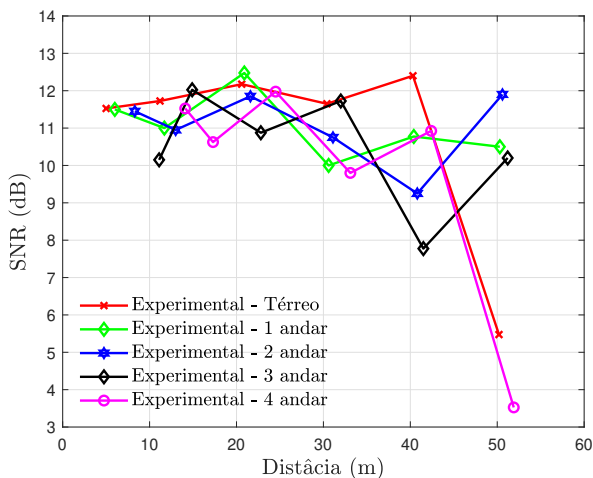


Fig. 8: SNR em função da distância.

O primeiro e o segundo andar apresentam os melhores desempenhos relacionados à estabilidade da SNR ao longo do caminho, o que pode ser relacionado à posição entre receptor e transmissor, oferecendo uma menor quantidade de obstáculos durante o percurso do sinal. Em contrapartida, o terceiro andar apresentou oscilações consideráveis, enquanto o quarto andar apresentou a menor média de SNR no final do percurso, o que pode apontar para maiores desafios para a transmissão vertical ao longo dos andares.

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foram apresentados os resultados iniciais referentes à transmissão LoRa em um ambiente *indoor*. A

obtenção de dados de locais internos, como prédios e indústrias, apresenta uma dificuldade significativa que impacta diretamente o acompanhamento das atividades dentro deles. A tecnologia LoRa destaca-se como uma solução promissora, pois viabiliza a transmissão de dados em longas distâncias sem necessitar de uma infraestrutura de telecomunicações complexa. Através da análise preliminar dos dados, observa-se que a propagação no ambiente estudado é melhor modelada por modelos de Friis para os andares superiores (segundo, terceiro e quarto andares) e pela regressão exponencial para os andares inferiores (térreo e primeiro andar).

Como continuidade deste trabalho, pretende-se implementar novos nós sensores para ampliar a cobertura da área e avaliar mais detalhadamente as características da transmissão LoRa. Além disso, busca-se automatizar o recebimento dos dados, permitindo o envio das informações diretamente para a nuvem, possibilitando o aumento no volume de dados tratáveis.

REFERÊNCIAS

- [1] S. R. Silva, G. N. Lira, I. M. S. Cavalcante, F. B. S. Carvalho and W. T. A. Lopes. "Análise de Propagação de Dispositivos LoRa em Área de Mata Atlântica". In *Anais do XLII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT)*, pp. 1–5, 2024.
- [2] K. Rose, S. Eldridge and L. Chapin. "The Internet of Things: An Overview". *The internet society (ISOC)*, vol. 80, no. 15, pp. 1–53, 2015.
- [3] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee and J. Liu. "Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 37, no. 6, pp. 1067–1080, 2007.
- [4] T. I. O. Medeiros, Y. P. M. Rodriguez, F. B. S. Carvalho, C. P. Souza and P. H. M. Andrade. "Vegetation encroachment monitoring system for transmission lines using wireless sensor networks". In *2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2018.
- [5] F. B. S. Carvalho, T. I. O. Medeiros and Y. P. M. Rodriguez. "Monitoring System for Vegetation Encroachment Detection in Power Lines Based on Wireless Sensor Networks". In *2018 41st International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp. 522–525, 2018.
- [6] L. Alliance. "LoRa". Disponível em: <https://lora-alliance.org/about-lora-alliance/>. Acesso em: 04 maio 2025, 2022.
- [7] S. Kandeepan, K. Wang, T. Samarasinghe and C. Divarathne. "Spatial Correlation in Shadow Fading for Wireless Communication". In *2024 3rd International Conference on Artificial Intelligence For Internet of Things (AIIoT)*, pp. 1–5, 2024.
- [8] T. Rappaport. *Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas*. Pearson Universidades, 2008.
- [9] M. Hata. "Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 317–325, 1980.
- [10] F. S. Mukti, P. D. P. Adi, D. A. Prasetya, V. Sihombing, N. Rahanra, K. Yuliawan and J. Simatupang. "Integrating Cost-231 Multiwall Propagation and Adaptive Data Rate Method for Access Point Placement Recommendation". *International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA)*, vol. 12, no. 4, pp. 772–777, 2021.
- [11] P. Series. "Propagation Data and Prediction Methods for the Planning of Indoor Radiocommunication Systems and Radio Local Area Networks in the Frequency Range 900 MHz to 100 GHz". *Recommendation ITU-R*, pp. 1238–7, 2012.
- [12] C. M. Sobrinho, F. Madeiro, M. S. Alencar and W. T. A. Lopes. "Modelo Empírico de Predição de Perdas em Ambientes Fechados". *Anais do XXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT'09)*, Blumenau, SC, Setembro, 2009.
- [13] Semtech Corporation. "SX1278 - LoRa Transceiver". <https://www.semtech.com/products/wireless-rf/lora-connect/sx1278>, 2025. Acesso em: 18 maio 2025.
- [14] J. J. Rubio. "Stability Analysis of the Modified Levenberg-Marquardt Algorithm for the Artificial Neural Network Training". *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 32, no. 8, pp. 3510–3524, 2021.