

Análise Preliminar das Perdas de Potência no Percorso para Tecnologia LoRa em Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz

Abstract – Low Power Wide Area Networks (LPWAN) represent a new trend in the evolution of telecommunications designed to enable a wide range of Internet of Things (IoT) applications, presenting great acceptance on the world stage due to large signal coverage, low power consumption and low energy consumption implementation cost. The present work aims to establish the characterization of the indoor propagation environment, from the path loss data in the frequency range of 915 MHz ISM band using 14 dBm transmit power and spreading factor 7, 9, 10 e 12, and thus obtain the coverage of the signal LoRa.

Palavras-Chave – LoRa; Caracterização; Propagação

I. INTRODUÇÃO

Na atualidade, observamos um mundo cada vez mais tecnológico em que a capacidade de monitoração da informação tornou-se relevante. Nas últimas décadas, houve um crescimento exponencial no número de dispositivos conectados à rede mundial de computadores, o surgimento da Internet das Coisas (IoT) possibilitou que objetos físicos se conectassem a centrais específicas de processamento com a capacidade de auto-organização, compartilhamento de informações e recursos, reagindo e agindo diante de situações e mudanças no ambiente estrutural e produtivo industrial [1].

A quarta revolução industrial ou Indústria 4.0 baseia-se na intercomunicação de dispositivos móveis, redes de sensores, tecnologias de localização e dispositivos inteligentes conectados em nuvem (*Cloud Computing*) possibilitando a análise e o processamento massivo dos dados (*Big Data Analytics*) sejam gerenciados por sistemas cognitivos, com isso, apresentando um impacto significativo na produtividade, pois representa a automação industrial e a integração de diferentes tecnologias visando promover a digitalização das atividades produtivas e melhorando o processo como um todo.

Geralmente dadas as características físicas onde as máquinas e elementos da cadeia produtiva são instalados, os dispositivos inteligentes que monitoram os processos físicos, em sua grande maioria, empregam dispositivos de rádio frequência para o envio das informações. Entretanto, os dispositivos de comunicação sem fio sofrem degradação do sinal de comunicação em função das características do canal de propagação, logo sendo imprescindível uma análise e avaliação da robustez do sistema de comunicação e o conhecimento do comportamento do sinal.

Atualmente, as tecnologias LPWAN associadas a dispositivos inteligentes têm uma ampla aplicabilidade em emprego dual, ou seja, em setores da sociedade civil e também no cenário de emprego militar.

Podemos citar a aplicabilidade das redes de sensores sem fio no monitoramento de paraquedistas [2], cujo propósito é realizar a transmissão dos dados vitais do combatente para uma

central de monitoramento em tempo real e os estudos envolvendo o emprego de veículos aéreos não tripulados (VANT), por uma intercomunicação empregando redes sem fio [3].

Este artigo tem como propósito apresentar a verificação do desempenho de um sistema de comunicação móvel baseado em rede de sensores sem fio, mais especificamente à tecnologia incipiente denominada LPWAN (*Low Power Wide Area Network*) com o emprego do protocolo de comunicação LoRaWAN (*Long Range Wide Area Network*), em ambiente indoor, com o objetivo de se obter dados de perda de potência durante o percurso do sinal transmitido, no enlace ponto a ponto (P2P) na faixa de frequência de 915 MHz.

A caracterização do canal rádio móvel foi estabelecida através do enlace entre dois dispositivos móveis, sendo a estação transmissora fixa e a receptora móvel, para a campanha de medições estacionárias no interior das dependências do Bloco D do Prédio de Engenharia, localizado no Campus Praia Vermelha da Universidade Federal Fluminense (UFF).

O presente trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira. Seção II apresenta os conceitos teóricos referentes a tecnologia LoRa (*Long Range*) e o protocolo LoRaWAN, sua estrutura, funcionalidades da camada física e as propriedades da rede. Na Seção III é apresentada uma descrição do ambiente de medições e suas peculiaridades e o *setup* de transmissão e recepção. Na seção IV contempla o ponto principal deste trabalho, a metodologia das medições e o processamento dos dados. Na seção V é apresentado os resultados após o processamento dos dados e na seção VI é apresentado as conclusões desse trabalho baseada nos resultados obtidos durante a campanha de medições, bem como sugestão de trabalhos futuros.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

LoRa é uma tecnologia de rede de comunicação sem fio de código aberto, desenvolvida e patenteada pela empresa Semtech e operando nas bandas de frequência ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) [3].

O enlace de comunicação LoRa possibilita uma grande cobertura do sinal, atingindo enlaces na ordem de 10 km em áreas urbanas e suburbanas e de até 30 km em áreas rurais. Uma de suas principais características é o seu funcionamento com baixos níveis de sensibilidade no receptor, em torno de -148 dBm [5]. A seguir serão apresentadas as características intrínsecas da camada física e o protocolo de comunicação LoRaWAN.

A. Camada Física

A rede LoRa possui uma camada física ou modulação proprietária. A modulação LoRa se baseia no método de espalhamento espectral *Chirp Spread Spectrum* (CSS). Esta

técnica de codificação para transmissão digital do sinal, que usa a técnica de espalhamento no espectro de frequência gerando um sinal de portadora através de pulsos *chirp*, ou seja, o espalhamento espectral codifica os bits em símbolos, sendo que cada símbolo é representado por múltiplos “chips” e modulando os pulsos de *chirps* temporalmente [6].

As transmissões dos símbolos ocorrem através da variação da frequência do sinal senoidal em relação a uma frequência base. Esta variação é denominada *up-chirp* quando a frequência é crescente e *down-chirp* quando a frequência decresce. Dessa forma, a informação que o sinal transporta é dada pelos saltos de frequência, sendo que um salto quando decodificado representará um símbolo, que conseqüentemente representará um ou mais *bits* de dados, configurando M valores possíveis. Considerando SF como o *Spreading Factor* ou Fator de Espalhamento, ou seja, o parâmetro responsável por definir a quantidade de *chirps* que a portadora de dados envia por segundo, tem se que:

$$M = 2^{SF} \quad (1)$$

A taxa de símbolo (R_s) é a razão entre a taxa de chips e a taxa em que a informação é espalhada sendo calculada como:

$$R_s = \frac{1}{T_s} = \frac{BW}{2^{SF}} \left[\frac{\text{símbolo}}{s} \right] \quad (2)$$

Normalmente, as redes LoRa podem utilizar larguras de banda (BW - *Bandwidth*) de 125, 250 e 500 kHz e SF selecionáveis de 6 até 12 [7]. A relação entre BW e SF é essencial para determinar o *Time on Air* (ToA), que é o tempo total decorrido para uma transmissão de dados em função do *payload*. Para a transmissão de um pacote com 50 bytes usando BW de 125 kHz, o ToA é de 0,113s para SF-7, enquanto usando SF-12 o ToA é de 2,62s, ou seja, a latência para recepção dos dados é de pelo menos 20 vezes superior para SF-12 do que SF-7 [8]. Na Fig. 1, é apresentado o gráfico do ToA em função do SF.

A partir de (2), a duração de um símbolo LoRa (T_s) pode ser determinada por:

$$T_s = \frac{1}{R_s} = \frac{2^{SF}}{BW} [s] \quad (3)$$

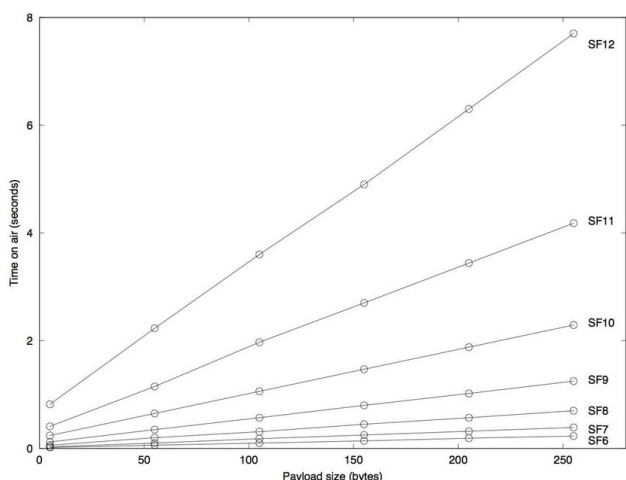


Fig. 1: ToA em função do *payload* para os diferentes valores de SF [9].

Ressalta-se que a variação dos parâmetros de SF influenciam na sensibilidade do limiar de recepção em termos de potência, tempo de duração de símbolo, cobertura do sinal e na taxa de transmissão do enlace [5]. A taxa de transmissão R_b , representa a taxa de bits efetiva do sistema podendo ser calculada como:

$$R_b = SF * \frac{BW}{2^{SF}} * CR [bps] \quad (4)$$

Outra variável importantíssima da camada física é a taxa de codificação (*Code Rate* - CR). Este parâmetro define a quantidade de bits acrescidos aos dados de redundância na mensagem, cujo objetivo é realizar a recuperação de erros e influencia diretamente na robustez do enlace de comunicação, com isso maximizando a probabilidade de recepção bem-sucedida de pacotes.

$$CR = \frac{4}{4+n}, \text{ com "n"} \in \{1,2,3 \text{ e } 4\} \quad (5)$$

Na Fig. 2 são apresentados os parâmetros variáveis da camada física para uma rede LoRa.

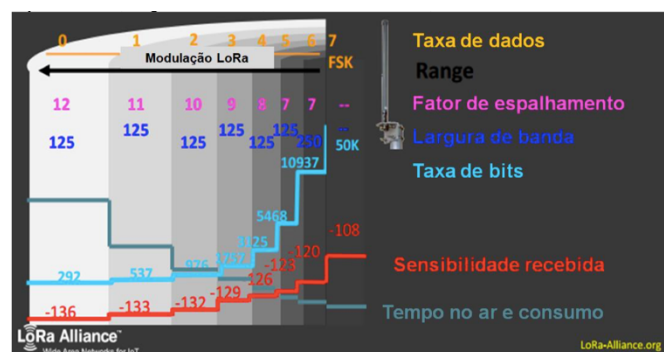


Fig. 2: Comparativo da escalabilidade da rede LoRa.

Fonte: LoRa® Alliance [6].

B. Protocolo LoRaWAN

O Protocolo LoRaWAN é um protocolo de camada de enlace de dados que estabelece as regras e parâmetros de comunicação entre os componentes da arquitetura e de acesso ao meio através da Camada *Medium Access Control* (MAC) do sistema, permitindo a troca de informações entre dispositivos periféricos e o *gateway* [10].

A arquitetura típica da implementação de uma rede LoRaWAN é composta por *end-devices* que se comunicam com um ou mais gateways através de uma rede em topologia em estrela. No que tange à especificação da camada, a transmissão dos dados é executada em canais diferentes, logo os *end-devices* são pré-configurados conformes as classes de dispositivos (Classes A, B e C), oferecendo um câmbio entre duração da bateria e latência no *downlink*. A Fig. 3, apresenta as características das classes do sistema LoRa.

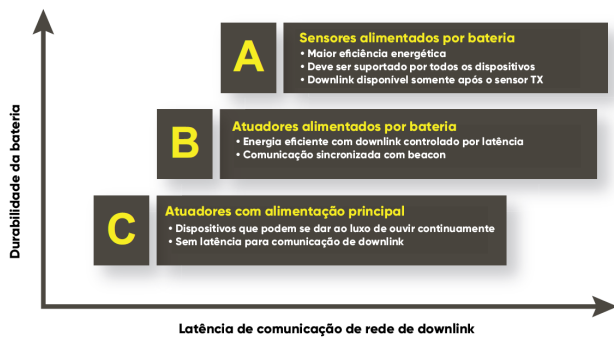


Fig. 3: Comparativo entre as classes de dispositivos [11].

A camada MAC é responsável pelo gerenciamento de todo fluxo de dados, definindo comandos utilizados em comunicações bidirecionais, com isso permitindo a verificação de conectividade, alteração do canal de comunicação, adaptação da taxa de dados, dentre outras funcionalidades.

III. AMBIENTE E SETUP DAS MEDIÇÕES

Para possibilitar a caracterização e análise da cobertura do sinal em ambiente indoor, em diferentes situações (com e sem linha de visada entre transmissor e receptor), foram realizadas medições pontuais e estacionárias para obtenção dos dados que permitisse o cálculo da perda de potência do sinal em função da variabilidade de diferentes configurações de fatores de espalhamento utilizados na modulação LoRa. Neste tópico serão apresentadas as características do ambiente e a descrição do sistema de medição.

A. Descrição do Ambiente de Medição

As campanhas de medições foram realizadas no interior do Bloco D do prédio de Engenharia da UFF, sendo o mesmo um edifício de alvenaria da década de 70, que possui 5 andares e fachada envidraçada. Os andares apresentam separações internas com paredes de concreto, janelas de vidros e portas de *drywall*.

No interior do Bloco D, as dimensões de cada andar são de 125 m (comprimento) x 20 m (largura), a Fig. 4 apresenta o layout da planta baixa do 2º andar do prédio de Engenharia que apresenta layout similar aos andares 3, 4 e 5. Por outro lado, como pode ser observado na Fig. 5, o 1º andar apresenta um layout diferente dos demais.

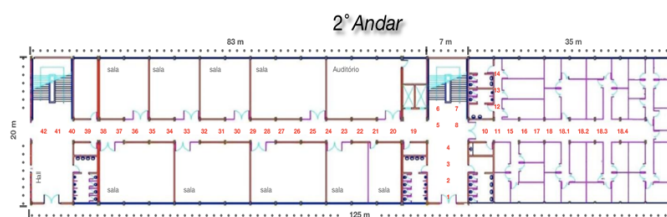


Fig. 4: Planta baixa do 2º andar [12].

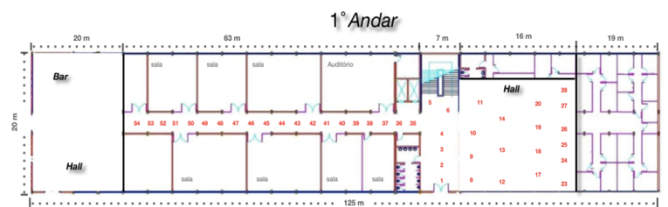


Fig. 5: Planta baixa do 1º andar [12].

Na Fig. 6 é apresentado o layout do interior do Bloco D do prédio de Engenharia.

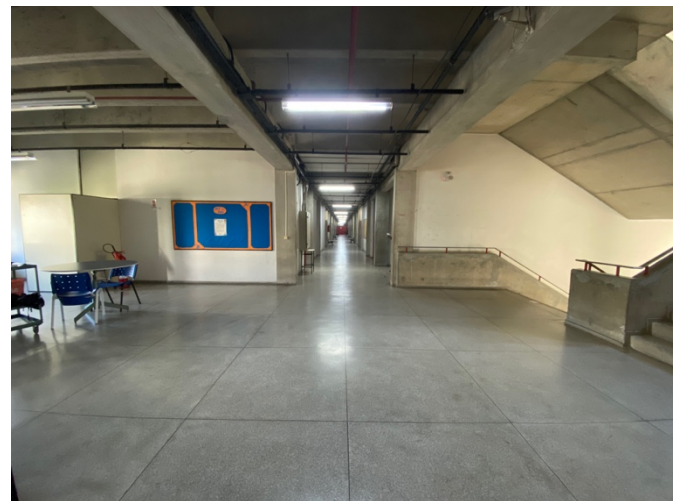


Fig. 6: Hall e corredores do Bloco D [12].

B. Setup das Medições

Para realização das campanhas de medições, foi estabelecido um sistema composto por dois microcontroladores com Placa Heltec ESP32 LoRa (*Datasheet SX1276*) e display de Oled, sendo um transmissor e outro um receptor, duas antenas monopolo *Whip* e cabos coaxiais interligando o dispositivo na antena. Foram estabelecidos os parâmetros de configuração nos dispositivos ESP32 LoRa de: frequência da portadora de 915 MHz, potência de transmissão de 14 dBm, largura de banda de 125 kHz, fatores de espalhamento 7, 9, 10 e 12 e ganho das antenas de 5 dBi.

O sistema de transmissão permaneceu fixo na parte externa do Prédio de Engenharia, mas com linha de visada para o Bloco D e a unidade receptora permanecendo no interior do bloco em questão. Os sistemas de transmissão (Tx) e recepção (Rx) foram montados sobre um carinho, para facilitar o deslocamento e, também para posicionar suas antenas a 1 metro de altura em relação ao piso. Na Fig. 7, é apresentado o posicionamento da antena transmissora.

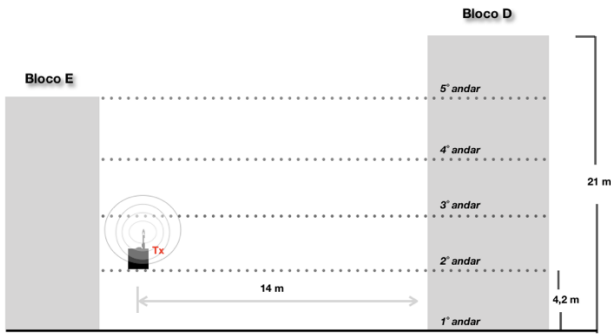


Fig. 7: Posicionamento da antena Transmissora [12].

IV. METODOLOGIA E PROCESSAMENTO DOS DADOS

O objetivo das campanhas de medições foi a obtenção de dados de potência recebida, com a finalidade de verificar o comportamento do sinal propagado, e com isso determinar a variabilidade das perdas de potência durante o percurso causadas pelos fenômenos de propagação.

No receptor foram coletados os níveis de sinal recebido indicado RSSI (*Received Signal Strength Indication*) em função dos fatores de espalhamento para marcações pontuais pré-estabelecidas, como podemos observar nas Fig. 4 e 5.

As distâncias entre Tx e Rx, com e sem linha de visada, foram mensuradas a partir do teorema de Pitágoras, conforme apresentadas na Fig. 8.

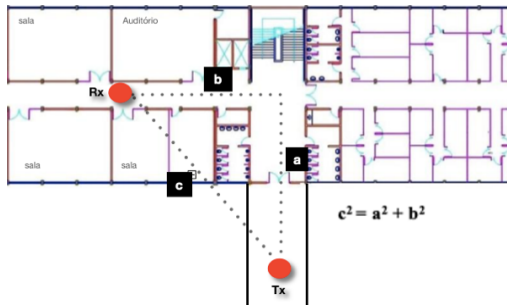


Fig. 8: Metodologia para medição das distâncias Tx-Rx.

Para as configurações dos dispositivos, foi implementado um algoritmo utilizando a plataforma Arduino, em linguagem C++, com o objetivo de realizar o envio de pacotes de dados. Foi estabelecida a cinemática de envio de 1 pacote em intervalos de tempo de 2 segundos e ao término do ciclo de medições, os dispositivos eram reconfigurados para outro SF.

O dispositivo receptor ao receber o pacote de dados, contabiliza-o e paralelamente mensura o nível de RSSI e a relação SNR do enlace de comunicação. As coletas de dados deram-se por um período de 30 segundos ininterruptos, sendo possível obter 15 amostras do sinal que foram posteriormente utilizadas para calcular a média.

A partir da obtenção das médias de RSSI, foram realizadas as comparações entre os dados da intensidade do sinal recebido e do Espaço Livre. A potência média recebida por uma antena no espaço livre é expressa por (6), também conhecido como modelo de Friis [13]. O modelo em questão é empregado para

mensurar a perda de potência média do sinal, considerando uma fonte pontual isolada e sem a presença de obstruções.

$$Pr(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \quad (6)$$

O cálculo da potência média recebida, em dBm, foi realizado subtraindo o ganho do receptor e somando o valor de *offset* de 46, calculado após simulações experimentais [11], ou seja:

$$Pr(dBm) = RSSI(dBm) - Ganho(Rx) + offset \quad (7)$$

Para o cálculo das perdas de potência do sinal durante o percurso ou *path loss* (PL), temos:

$$PL(dB) = EIRP - Pr(dBm) \quad (8)$$

Sendo a potência efetiva calculada como:

$$EIRP = Pot.(Tx) + Ganho(Tx) \quad (9)$$

V. RESULTADOS

A partir do cálculo da potência recebida e os conceitos teóricos apresentados em (7), (8) e (9), foi possível a determinação dos dados de perdas da potência do sinal durante o percurso (PL). O referencial teórico para a análise e geração das curvas de atenuação foi baseado no modelo empírico *log-distance*. Este modelo foi desenvolvido para mensurar a perda média em grande escala, sendo o cálculo da atenuação do sinal estabelecida em função da distância Tx-Rx e do coeficiente de decaimento do sinal “n” [14]. A formulação para o modelo *log-distance* é dada por:

$$PL(d) = Pr(d_0) - 10 n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) \quad (10)$$

Os valores de “n” foram determinados a partir dos dados de perda no percurso, os mesmos foram inseridos na ferramenta *Curve Fitting* (CF Tools) do software *Matlab*, então possibilitando a extração dos valores médios dos coeficientes de decaimento em função da distância para o ambiente indoor.

Na Fig. 9, são apresentados os valores médios do coeficiente “n” para cada andar.

Valores médios dos Coeficientes de Decaimento “n” para Andares					
	Andar 1	Andar 2	Andar 3	Andar 4	Andar 5
SF-7					
SF-9	2,485	2,435	2,485	2,54	2,725
SF-10					
SF-12					

Fig. 9: Coeficientes de decaimento “n” [12].

Nas Fig. 10 a 14, são apresentados os gráficos comparativos de perda no percurso em função do SF e das perdas previstas para os modelos de Friis e Log-Distance.

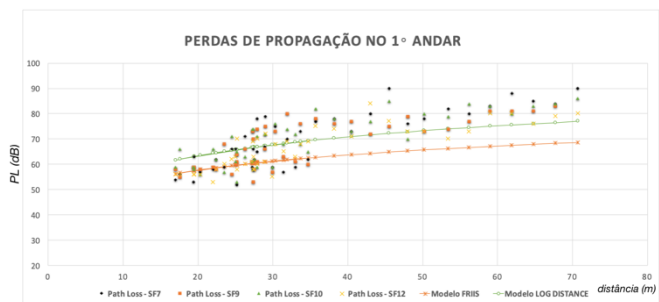


Fig. 10: Perdas de potência no 1º andar.

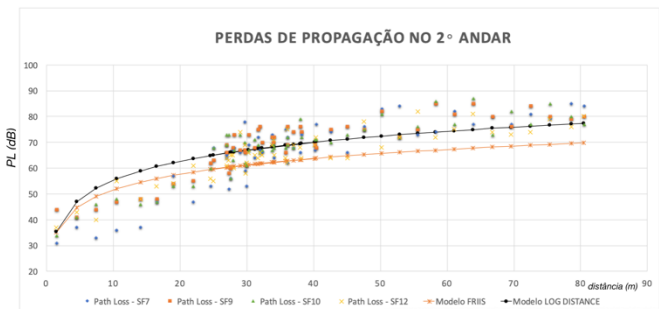


Fig. 11: Perdas de potência no 2º andar.

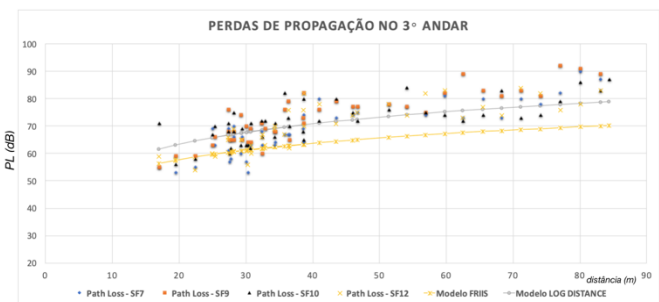


Fig. 12: Perdas de potência no 3º andar.

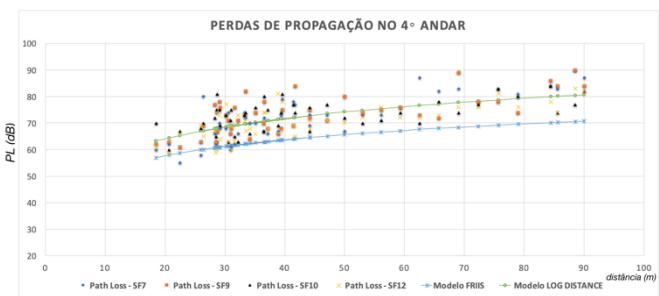


Fig. 13: Perdas de potência no 4º andar.

Após análise dos resultados, de uma forma geral, a curva de tendência do modelo *Log-Distance* mais se aproximou dos dados. As maiores perdas de potência foram registradas no 5º andar, fato justificado, primeiramente, pela existência de mais pontos de obstruções (andares, pisos, paredes e janelas) e, também a maior distância entre transmissor e receptor. Entretanto, os menores percentuais de perda de potência no percurso foram registrados no 2º, 1º e 3º andares respectivamente. As curvas de perda de potência no percurso apresentaram comportamentos concordantes com a teoria.

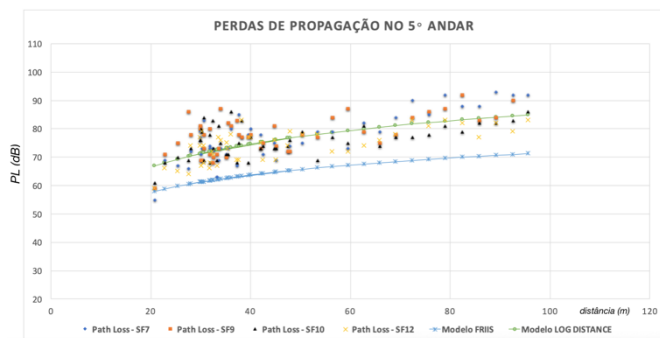


Fig. 14: Perdas de potência no 5º andar.

Ressalta-se que os dados registrados nas proximidades do *hall* apresentam níveis de perda inferiores em relação à perda de potência prevista para o Espaço Livre. Este fato pode ser explicado devido ao reforço do sinal nesta região atribuído às componentes de multipercursos oriundas do vão da escada do andar superior e inferiores, janelas amplas e com pouca obstrução no bloco D. Por outro lado, como podemos observar nas Fig. 15 e 16, os dados dos 4º e 5º andares não sofrem uma influência significativa das componentes de multipercursos.



Fig. 14: Posicionamento da antena Tx com linha de visada para o Bloco D [11].

VI. CONCLUSÃO

Para análise e caracterização da cobertura do sinal propagado por um sistema LoRa em ambiente indoor, foram realizadas medições estacionárias na faixa de frequência de 915 MHz. O objetivo específico deste trabalho foi a caracterização das perdas de potência durante o percurso utilizando variações nas configurações da camada física do sistema.

Ao analisar os resultados, verificou-se que todos os valores analisados foram coerentes com os valores teóricos encontrados na literatura. É perceptível que os níveis de atenuação do sinal, no enlace de comunicação, apresentam perdas iniciais consideráveis entre os SF7 e SF12.

As abruptas variações da intensidade do sinal recebido são justificadas porque o sinal transmitido para o SF 12 permanece mais tempo no ar (*ToA – Time on Air*) em relação ao SF 7, logo proporcionando maior atenuação do sinal, apresentando comportamento coerente como encontrado na literatura.

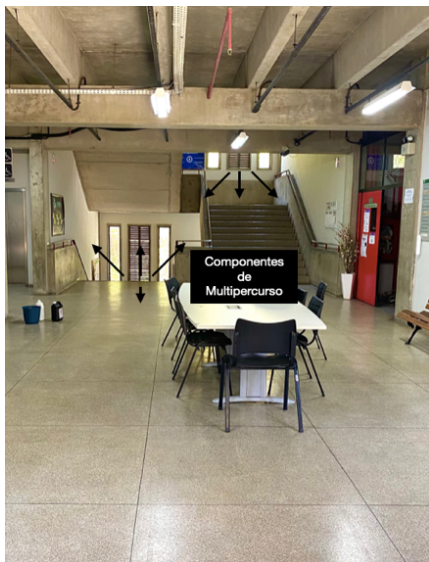


Fig. 16: Componentes de multipercursos oriundas dos andares superiores e inferiores [11].

A respeito das análises complementares, conclui-se que a cobertura do sinal pode atingir maiores áreas ou andares em espaços fechados, considerando o enlace de comunicação em condições LOS e NLOS, foram explorados ao máximo os espaços físicos do ambiente de medições e não foi possível explorar a máxima sensibilidade de recepção do equipamento conforme as especificações técnicas para a tecnologia LoRa, que são na ordem de -136 dBm [7][15].

Importante ressaltar que o propósito desse trabalho foi alcançado. Além dos resultados obtidos, outra grande contribuição deste trabalho foi a geração de um banco de dados com mais de 25.000 amostras coletadas e processadas e a elaboração de um *setup* para intercomunicação em ambiente indoor empregando a tecnologia LoRa.

Para trabalhos futuros, sugere-se a construção de um sistema maior, contemplando mais dispositivos LoRa, e enviando um maior volume de dados em edificações com mais de 5 andares.

REFERÊNCIAS

- [1] MADAKAN, S.; RAMASWAMY, R.; TRIPATHI, S. Internet of things (iot): A literature review. *Journal of Computer and Communications*, 2015.
- [2] MATOS, Pedro Miguel Pinheiro, PARAMONITORING - MONITORIZAÇÃO DE DADOS BIOMÉTRICOS E DE LOCALIZAÇÃO DE PARAQUEDISTAS EM OPERAÇÃO MILITAR. Dissertação (Mestrado) - Instituto Politécnico de Tomar, Tomar, Portugal, 2018.
- [3] S. Silfverskiöld, H. Liwång, G. Hult, Å. Sivertun, P. Bull, J. Sigholm, M. Lundmark, C. von Gerber, K. Andersson, and P. Sturesson, "Technology forecast 2017- military utility of future technologies: A report from seminars at the swedish defence university's (sedu) military-technology division," 2017.
- [4] NICO, N. G. P. M. Development of Low-cost LoRaWAN Gateway for Private Deployments. 2017. 58p. Master of Science Degree in Electrical and Computer Engineering — Instituto Superior Técnico Lisboa, Lisboa-Portugal.

- [5] CENTENARO, M. et al. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the iot and smart city scenarios. *CoRR*, abs/1510.00620, 2015.
- [6] Reynders, Brecht and Sofie Pollin. "Chirp spread spectrum as a modulation technique for long range communication." 2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT) (2016).
- [7] SEMTECH. AN120.22 LoRa Modulation Basics. Available online: <https://www.semtech.com/uploads/documents/>, 2015.
- [8] Mikhaylov, K.; Petäjärvi, J.; Hänninen, T. Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology. In *Proceedings of the European Wireless 2016*, Oulu, Finland, 18–20 May 2016; pp. 119–124.
- [9] *LoRaWAN Specification*, LoRa Alliance, 2015, rev. 1.0.
- [10] LoRa® Alliance. Disponível em <<https://www.LoRa-alliance.org/What-Is-LoRa/LoRaWAN-White-Papers>>.
- [11] LORA® ALLIANCE. A technical overview of LoRa® and LoRaWANTM. 2015.
- [12] Cunha, Michel Pessoa da. Análise e Caracterização da Cobertura LoRa para Ambiente Indoor na Frequência de 915 MHz. 2021. 99 fl. Dissertação de Mestrado (Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações) – Escola de Engenharia, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.
- [13] FRIIS, H. T. A note on a simple transmission formula. In: *Proc. IRE*. [S.l.: s.n.], Maio, 1946. p. 254–256.
- [14] RAPPAPORT, Theodore S. et al. *Wireless Communications: Principles and Practice*. New Jersey: prentice hall PTR, 1996.
- [15] LORA® ALLIANCE. A technical overview of LoRa® and LoRaWANTM. 2015.