

Linha de Visada e Alocação de Fator de Espalhamento em Redes LoRaWAN

Lucas L. de Oliveira, Gabriel M. de Macedo, Vicente A. de Sousa Jr. e Álvaro A. M. de Medeiros

Abstract—A caracterização do canal sem fio em função da linha de visada tem o potencial de aprimorar a alocação eficiente do fator de espalhamento em redes LoRaWAN. Ao adequar a alocação de fator de espalhamento e potência de transmissão às condições de cada canal, observa-se um aumento na taxa de entrega de pacotes. Baseado em simulações no *software ns-3* com dados de campanha de medição, resultados indicam que a identificação de visada permite adoção de estratégias mais simples, porém mais eficientes do ponto de vista energético e de desempenho.

Palavras-Chave—LoRaWAN, Perda de Percurso, Linha de Visada, Fator de Espalhamento

I. INTRODUÇÃO

As redes *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN) têm sido muito utilizadas em aplicações para Internet das Coisas. Tais redes se baseiam na técnica de camada física *Long Range* (LoRa), que define o fator de espalhamento (do inglês, *Spreading Factor*) (SF), que modula o sinal transmitido e cujo valor pode variar entre 7 e 12. Maiores SFs possibilitam um maior alcance da transmissão, porém com menor *throughput* e maior tempo para a entrega de pacotes, o que implica em maior consumo energético pelos dispositivos da rede.

Uma alocação eficiente de SF pode reduzir o consumo de energia sem reduzir a cobertura. Contudo, quando essa alocação é mal projetada, pode acarretar em perda de pacotes entregues, afetando o desempenho da rede ou em consumo excessivo sem necessidade [1]. A política de alocação de SF é dependente do ambiente de propagação, o que mostra a importância de caracterização do canal sem fio.

A identificação precisa de pontos Linha de Visada Direta (do inglês, *Line-of-Sight*) (LOS) e Sem Linha de Visada (do inglês, *Non-Line-of-Sight*) (NLOS) é um fator relevante para caracterização do canal [2]. A utilização de dois canais distintos, um LOS e outro NLOS, representa uma alternativa para a construção de modelos de canal mais realistas, já que permite capturar as características de atenuação em cada cenário de propagação. Além disso, essa abordagem está de acordo com recomendações do 3GPP, que define funções de

probabilidade de LOS para determinar, estatisticamente, a seleção do modelo apropriado em função da distância [3]. Em aplicações de ambientes urbanos, a distinção entre canais possibilita a integração de estratégias de adaptação, como controle de potência e escolha de SF de acordo com o perfil de cada canal, resultando em melhor desempenho da rede [4].

Nos ambientes LOS, a propagação do sinal ocorre com menor atenuação, que permite redução da potência de transmissão P_{tx} e a alocação em SFs mais baixos, o que resulta em menor consumo energético. Por outro lado, quando há detecção de obstruções que prejudicam a visada, a propagação do sinal sofre maior atenuação, exigindo a utilização de SF mais elevados e o aumento da P_{tx} para compensar a diminuição do Indicador de Intensidade do Sinal Recebido (do inglês, *Received Signal Strength Indicator*) (RSSI), o que implica em um consumo energético mais elevado.

Esse artigo apresenta uma modelagem do canal baseada em linha de visada e propõe estratégias de alocação de SF para redes LoRaWAN baseadas na campanha de medição apresentada em [2]. A modelagem do canal é baseada na perda de percurso, sendo ideal para incorporação em um simulador de rede e posterior análise de desempenho focada nos diferentes aspectos do protocolo LoRaWAN. Para isso, os dados do canal obtido na campanha são incorporados ao simulador *Network Simulator 3* (ns-3) [1]. Uma campanha de simulações é executada com o objetivo de avaliar o impacto das estratégias de ajuste de SF propostas em comparação com o algoritmo *Adaptive Data Rate* (ADR), que é o algoritmo de alocação de SF padrão da *LoRaWAN Alliance*. Para tanto, melhorias no módulo LoRaWAN do ns-3 utilizado tiveram que ser implementadas e estão disponíveis em [5].

O restante do artigo está organizado conforme descrito a seguir. A Seção II apresenta os trabalhos anteriores relacionados a este artigo. A Seção III-D descreve o processo de modelagem do canal. A Seção IV detalha a campanha de simulação e os resultados. A Seção V traz considerações finais.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

São debatidos modelos de Perda de Percurso (do inglês, *Path Loss*) (PL), clássicos e mais recentes, em [6], bem como suas características e os tipos de cenários mais utilizados. Além disso, os autores discutem fatores que influenciam no ajuste do modelo escolhido, como o uso de filtros para remoção de ruídos presentes e técnicas de *Machine Learning* para adequar os dados. Em [4], os autores destacam a adoção de identificação de visada como alternativa para modelagem de canal devido à capacidade de adicionar controle de

Lucas L. de Oliveira e Álvaro A. M. de Medeiros são do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora-MG, Brasil, e-mail: lucaslima.oliveira@estudante.ufjf.br, alvaro.medeiros@ufjf.br; Gabriel M. de Macedo e Vicente A. de Sousa Jr. são do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, Brasil, email: {gabriel.maia.115,vicente.sousa}@ufrn.edu.br. Gabriel M de Macedo é pesquisador do Instituto de Pesquisas Eldorado, Manaus-AM. Esse trabalho foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)- Código de Financiamento 001. As simulações fornecidas por esse trabalho foram realizadas com o apoio do Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

parâmetros de rede com rápida troca de estados, obtendo resultados de relevância. Na literatura, são encontradas aplicações em que a identificação LOS/NLOS são utilizadas como localização de terminal [7], em redes veiculares [8] e industriais [9]. Outros trabalhos apresentam modelos de PL para redes LoRaWAN [10], [11], cujos resultados apontam o modelo log-distância como boa opção. Além da campanha de medição utilizada neste artigo, autores em [2] propõem uma classificação LOS/NLOS inteligente com algoritmos de aprendizado de máquina.

Ademais, autores em [12]–[14] indicam que alocações de SF ajustadas podem obter resultados melhores que o ADR. Algumas estratégias de atribuição simples podem ser aplicadas à um Dispositivo Final (do inglês, *End Device*) (ED) com capacidade de processamento modesto. Para isso, em [12], define-se o vetor de atribuição $\vec{a} = \{a_7, a_8, \dots, a_{12}\}$, em que a_7 denota a fração do total de EDs da rede LoRaWAN que são alocados para SF7, a_8 para SF8, e assim por diante, de forma que $\sum_{i=7}^{12} a_i = 1$. Enquanto isso, [13] aplica essas estratégias para redes extensas e [14] conclui que tais estratégias prevalecem em relação ao ADR devido a tendência do ADR concentrar o uso de um mesmo SF na rede, provocando aumento da Taxa de Pacotes Interferidos.

III. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL

Para caracterização dos canais LOS e NLOS, optou-se pela utilização do modelo de propagação log-distância devido à sua capacidade de capturar o comportamento da atenuação do sinal recebido $PL(d)$ em função da distância do transmissor d . Esse modelo apresenta uma formulação que incorpora parâmetros como o expoente de atenuação n_a , que sintetiza os efeitos de larga escala na atenuação do sinal recebido, além de perda de referência $PL(d_0)$ e distância de referência d_0 , isto é, [15]

$$PL(d) = PL(d_0) + 10 n_a \log_{10} (d/d_0). \quad (1)$$

Outrossim, o modelo log-distância possui maior simplicidade matemática que, aliada à facilidade de ajuste com dados reais, tem justificada a sua aplicação em análises de larga escala e simulações de redes sem fio. Para determinação dos valores dos parâmetros para (1), utilizou-se dados obtidos em uma campanha de medição.

A. Campanha de Medição

A campanha de medição compreende os pontos de maior circulação dos ônibus circulares da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Visando cobrir uma região de relevo acidentado, vegetação extensa e com prédios de diferentes alturas, uma antena omnidirecional colinear que opera na faixa de 915 MHz foi instalada no topo do prédio de maior altitude por possuir visada direta para outros prédios da universidade. O Gateway (GW) foi disposto no mesmo prédio e, por fim, um ED foi desenvolvido para capturar os dados em movimento pelo campus da UFJF. Ao final da coleta, tem-se 794 amostras, das quais 238 são LOS (29,97%) e 556 NLOS (70,03%), evidenciando os obstáculos de visada. Mais detalhes são encontrados em [2] e todos dados obtidos na campanha estão disponíveis em [5].

B. Diagrama de Radiação da Antena do GW

Para utilizar (1), são necessários ajustes dos dados coletados. O primeiro ajuste consiste na inserção do diagrama de radiação da antena do GW, já que foi utilizada uma antena omnidirecional do tipo colinear, caracterizada por um padrão de radiação omnidirecional no plano azimutal (horizontal) mas com variação direcional no plano de elevação (vertical). Como o ganho da antena não é uniforme em todos os ângulos de incidências verticais, é inserida uma atenuação baseada em seu diagrama de radiação para normalizar as medições de potência recebida. Essa etapa permitiu ajustes entre pontos com maior ganho e menor ganho da antena que foram coletados ao longo da campanha de medição, eliminando a diferença de ganho relativa entre eles, conforme diagrama de radiação no plano vertical disponível em [5].

C. Remoção de Outliers

Após análise do ganho, busca-se reduzir os valores discrepantes (*outliers*). São eliminadas amostras LOS que estavam a menos de 5 metros em relação às amostras NLOS, isto é, amostras próximas à decisão de visada. Removendo essas amostras, garante-se também uma independência entre amostras, o que facilita a modelagem do canal.

Após isso, separa-se os dados em dois *datasets*, um para LOS e outro para NLOS. Com isso, aplica-se Filtros Média Móvel com janela deslizante (FMM) personalizados para cada caso a fim de suavizar ruídos [16], sendo testada uma série de combinações de ordens diferentes de filtro para cada canal.

O FMM recebe o sinal de entrada e aplica uma média ponderada dos valores presentes em uma janela definida, para reduzir variações bruscas. Desta forma, o FMM diminui a influência de variações atípicas no sinal de entrada e a ordem do filtro é determinada pelo tamanho da janela utilizada e, à medida que a janela aumenta, o sinal se torna mais suavizado. Porém, filtros com ordem excessivamente grandes tendem a perder detalhes da informação original, portanto é importante escolher um FMM com uma ordem que seja capaz de eliminar as variações bruscas e conservar a informação original [16].

Na implementação padrão, a primeira janela é utilizada para calcular a média inicial. Porém, em algumas aplicações, como neste artigo, pode ser desejável descartar a primeira janela se ela possuir dados não representativos. Nesse caso, o cálculo da média começa apenas a partir da segunda janela em diante. Em vez de recalculer toda soma para cada nova amostra, ele utiliza a soma anterior e ajusta apenas os valores que entram e saem da janela.

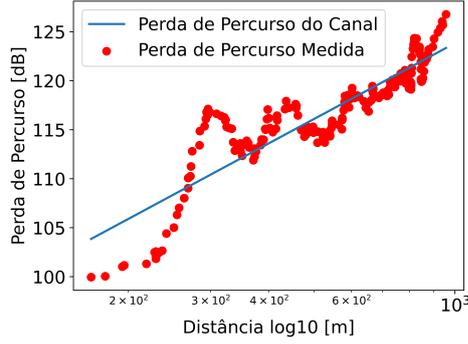
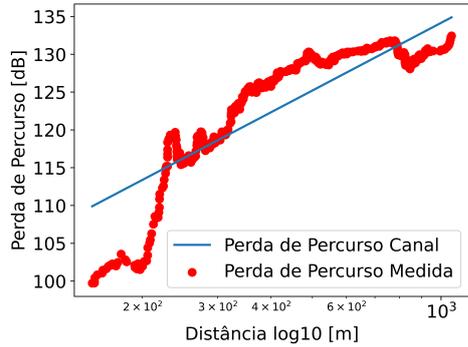
A combinação de melhores resultados é a seguinte:

- LOS - É aplicado um FMM de ordem 10 que desconsidera a primeira janela.
- NLOS - É aplicado um FMM de ordem 32 que desconsidera a primeira janela.

A partir destes ajustes, modelam-se os canais LOS e NLOS.

D. Modelagem dos Canais LOS e NLOS

A modelagem da perda de percurso apresentada pela Equação 1 pode ser linearizada para facilitar a compressão de


 Fig. 1. Perda de percurso (dB) em função de $\log_{10}(d)$ (m) para LOS.

 Fig. 2. Perda de percurso (dB) em função de $\log_{10}(d)$ (m) para NLOS.

dados. A principal transformação aplicada é a conversão da distância d para escala logarítmica de base 10, tornando (1) uma relação linear entre a perda de percurso $PL(d)$ e $\log_{10}(d)$. Com isso, os dados são ajustados através de uma regressão linear que busca encontrar essa relação.

Por fim, pode-se definir d_0 como a menor distância na qual os dados estão dispostos após o processo de filtragem [15]. A partir dos valores de d_0 para cada ambiente, os parâmetros n_a , $PL(d_0)$ são obtidos com base nos coeficientes das retas, conforme apresentado na Tabela I, que também mostra os valores de Raiz do Erro Quadrático Médio (do inglês, *Root Mean Squared Error*) (RMSE) para cada modelo. As Figuras 1 e 2 apresentam a reta que representa a perda de percurso do canal, em azul, e os valores de perda de percurso medidos, em vermelho, dos canais LOS e NLOS, respectivamente. Observa-se um ajuste apropriado dos modelos aos valores medidos, obtendo a atenuação esperada de acordo com o aumento da distância em relação à antena.

Tendo em vista os canais obtidos e implementados no ns-3, simulações são executadas para verificar os efeitos do canal.

IV. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Seguindo a abordagem apresentada em [12], busca-se obter os melhores vetores \vec{a} para as diferentes combinações de canais LOS e NLOS. Para a campanha de simulações, são propostos 6 vetores \vec{a} , sendo que os três primeiros são escolhas apropriadas para cenários puramente LOS, enquanto os três últimos são adequados para cenários puramente NLOS. As estratégias de

TABELA I

PARÂMETROS PARA PROPAGAÇÃO DOS CANAIS LOS E NLOS.

	n_a	$PL(d_0)$	d_0	RMSE
LOS	2.57	79 dB	40.91 m	2.42 dB
NLOS	3.02	80 dB	27.53 m	3.78 dB

alocação de SF usadas se embasam no procedimento definido em [12], em que os EDs na rede são classificados por potência recebida em ordem decrescente e, em seguida, divididos para cada SF de acordo com as seguintes proporções:

$$\text{(I)} \quad \vec{a} = \{0, 65; 0, 1; 0, 05; 0, 1; 0, 05; 0, 05\}$$

$$\text{(II)} \quad \vec{a} = \{0, 7; 0, 1; 0, 1; 0, 05; 0, 04; 0, 01\}$$

$$\text{(III)} \quad \vec{a} = \{0, 6; 0, 2; 0, 05; 0, 05; 0, 05; 0, 05\}$$

$$\text{(IV)} \quad \vec{a} = \{0, 16; 0, 16; 0, 16; 0, 16; 0, 16; 0, 16\}$$

$$\text{(V)} \quad \vec{a} = \{0, 05; 0, 1; 0, 2; 0, 2; 0, 25; 0, 2\}$$

$$\text{(VI)} \quad \vec{a} = \{0, 05; 0, 1; 0, 1; 0, 1; 0, 1; 0, 25; 0, 40\}$$

Os vetores \vec{a} apresentados foram escolhidos após extensivos testes com os canais implementados no ns-3 seguindo o seguinte procedimento:

- Busca por estratégia de alocação de SF que maximizaram Taxa de Entrega de Pacotes (do inglês, *Packet Delivery Ratio*) (PDR) e minimizaram a Taxa de Pacotes Interferidos, sendo a P_{tx} fixa e igual a 14 dBm, limitante superior de potência implementado no módulo LoRaWAN utilizado [1];
- Encontrada alocação com resultado satisfatório, reduz-se a P_{tx} em 3 dB até que alcance o limite inferior de potência implementado pelo chip LoRa SX1272 [17] ou o valor limite no qual não ocorre perda de pacotes por sensibilidade do canal verificado.

A P_{tx} impacta, em termos de taxa de entrega de pacotes, apenas na relação entre pacotes não recebidos por estarem abaixo da sensibilidade do receptor [14]. Com isso, buscou-se reduzir o valor de P_{tx} até alcançar um valor que garante pacotes acima da sensibilidade para a maioria dos raios variados nas simulações, reduzindo assim o consumo energético. Seguindo esse critério, adota-se a P_{tx} igual 3 dBm para EDs LOS e 9 dBm para EDs NLOS.

As simulações avaliam o tráfego de 1000 EDs que são posicionados aleatoriamente com distribuição uniforme e raio variável ao redor de um único GW, enviando um pacote em um tempo aleatório com periodicidade de envio de 10 minutos, conforme apresenta a Tabela II. A fim de testar ainda mais as alocações definidas pelos vetores \vec{a} , três sorteios aleatórios são feitos ao longo da simulação com o objetivo de alterar o canal e o posicionamento dos EDs, mantendo a proporção de LOS/NLOS configurada inicialmente, totalizando quatro posicionamentos aleatórios em cada simulação.

O objetivo dessas simulações é comparar o desempenho do ADR e de vetores \vec{a} propostos nos cenários de variação de proporção de EDs em situação de LOS ou NLOS e ao longo de diferentes raios de simulação. Para garantir confiabilidade às simulações, o intervalo de confiança de 95% é preservado, com cada simulação sendo realizada dez vezes.

Entretanto, as simulações com dois canais simultâneos não são simples de serem implementadas. O módulo LoRaWAN do ns-3 utilizado [1] não foi desenvolvido para que uma

TABELA II
 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.

Parâmetro	Valor
Tamanho do pacote	23 Bytes
Raios	2,3,4,5,6,8 km
Número de EDs	1000
Tráfego	Uplink
Potências de transmissão	3 dBm (LOS), 9 dBm (NLOS)
Largura de banda	125 kHz
\vec{a}	I,II,III,IV,V,VI, ADR
Periodicidade de envio	600 s

rede utilize mais de um canal de propagação. Portanto, uma exaustiva investigação foi realizada para desenvolver uma ferramenta capaz de simular dois canais simultâneos. Alternativas mais sofisticadas consistiriam na adaptação dos arquivos já existentes no módulo LoRaWAN utilizado, porém demandariam uma série de alterações, o que poderia levar a erros caso algum arquivo do ns-3 fosse mal configurado ou não fosse atualizado por desconhecimento. Diante disso, optou-se por modificar o menor número de arquivos externos ao módulo, condensando as mudanças necessárias ao arquivo *main.cc*. Realizaram-se mudanças nos códigos referentes ao canal e à camada MAC. Mais detalhes desta contribuição ao módulo LoRaWAN do ns-3 se encontram em [5].

Os resultados obtidos simbolizam a média das 10 simulações realizadas para garantir o intervalo de confiança desejado. Para validação dos vetores de alocação \vec{a} propostos, a PDR de 3 cenários e o consumo energético do último é verificada: 100% NLOS; 100% LOS; 70% NLOS 30% LOS.

A. Cenário 1: 100% NLOS

Neste cenário, tem-se que todos os EDs da rede utilizam o canal NLOS. A Figura 3 apresenta a PDR em relação à distância de disposição dos EDs para os 6 vetores \vec{a} propostos em comparação com o ADR. É possível observar a redução de PDR com o aumento do raio. O método ADR (vermelho) se mostrou a melhor opção apenas para o cenário em que os dispositivos estão posicionados ao longo de um raio de 2 km. Neste caso, por estarem próximos do GW, o ADR determina que os EDs façam uso do SF7, já que a sensibilidade do GW é suficiente para receber os pacotes enviados com tal SF.

A partir de 3 km, o ADR apresenta desempenho inferior e o principal motivo é o fato de atribuir muitos EDs com o mesmo SF, o que aumenta a ocorrência de pacotes interferidos, como mostrado em [14]. Em geral, o vetor (V) apresentou o melhor resultado ao longo dos raios, reforçando que a estratégia de distribuir EDs de forma mais próxima da igualitária pode contribuir para aumento de cobertura. Estratégias (I), (II) e (III) apresentaram os piores resultados, em média, para o cenário 100% NLOS por utilizarem SFs mais baixos. Assim, tais algoritmos apresentam PDR abaixo do ponto de operação, exceto para os raios de 2 km e 3 km, nos quais os dispositivos estão mais próximos do GW.

B. Cenário 2: 100% LOS

Neste cenário, tem-se que todos os dispositivos da rede utilizam o canal LOS. A Figura 4 apresenta a PDR em relação

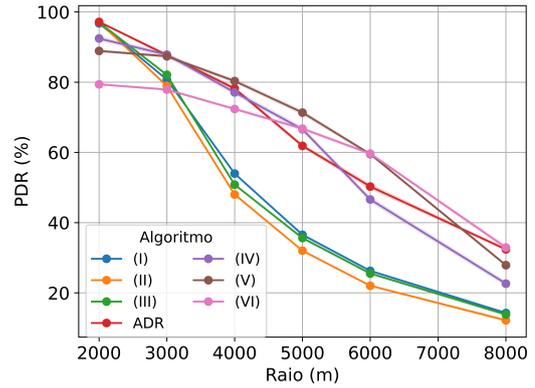


Fig. 3. PDR em função do raio para EDs com canais 100% NLOS.

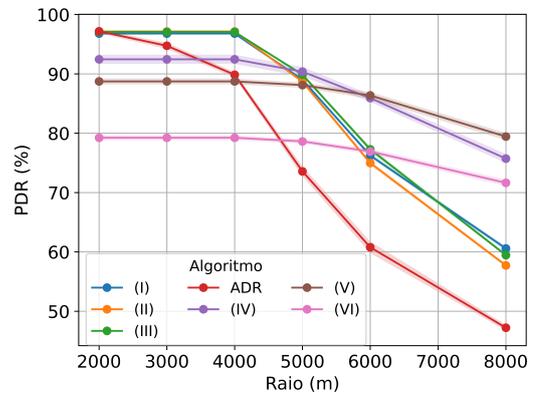


Fig. 4. PDR em função do raio para EDs com canais 100% LOS.

ao raio de disposição dos EDs em torno do GW, comparando o desempenho dos 6 vetores \vec{a} propostos com o ADR. É notável o baixo desempenho do ADR em relação aos outros para distâncias maiores ou iguais a 4 km, sendo crítico a partir de 5 km. A partir desse raio, o ADR passou a ter o pior desempenho entre todos comparados, inclusive abaixo de vetores \vec{a} que focam no cenário NLOS, como (IV), (V) e (VI). A razão para isso é a mesma do Cenário 1: o ADR impõe que os EDs usem o SF mínimo para garantir a recepção do sinal, neste caso em SF maiores. Porém, isso aumenta a interferência entre os EDs pela maior utilização do canal (*air time*), resultando em queda de desempenho.

Por fim, as propostas (I), (II) e (III) obtiveram o melhor desempenho para os raios menores (entre 2 e 4 km), sendo observado queda na PDR a partir de 5 km, embora neste ponto ainda possuam um índice de entrega de pacotes alto, próximo a 90%. Enquanto isso, as propostas (IV), (V) e (VI) desempenharam melhor para raios maiores, com destaque para (IV) e (V) que, embora não tenham apresentado as maiores PDRs para raios menores que 5 km, ainda tiveram desempenho em um patamar alto, aproximadamente 90%. As propostas (IV) e (V) manifestaram a menor variância de desempenho ao longo da simulação.

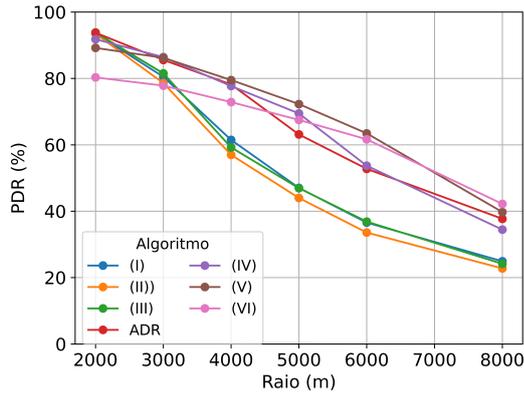


Fig. 5. PDR em função do raio para rede com 70% NLOS e 30% LOS.

TABELA III

CONSUMO MÉDIO DO ALGORITMO DE MAIOR PDR E DO ADR.

Raio (m)	Consumo(J) \vec{a}	Consumo (J) ADR
2000	3,34 (II)	2,31
3000	10,62 (IV)	5,02
4000	12,94 (V)	12,44
5000	12,94 (V)	18,94
6000	12,94 (V)	22,31
8000	17,65 (VI)	25,79

C. Cenário 3: 70% NLOS 30% LOS

O Cenário 3 segue a proporção de LOS/NLOS observada na campanha de medição. A Figura 5 apresenta a PDR, em função da distância em metros, comparando o desempenho dos 6 vetores \vec{a} propostos com o ADR.

Observa-se um desempenho superior do ADR apenas para o raio de 2 km. Nos demais, as propostas (IV), (V) e (VI) empatam para o raio de 3 km e superam o ADR a partir disso, com destaque para (V) até o raio de 6 km. No raio de 8 km, a PDR cai de forma acentuada, tornando a rede abaixo do ponto de operação apropriado. O Cenário 3 se assemelha ao Cenário 1 devido à grande proporção de dispositivos usando o canal NLOS, com diferença na taxa de decaimento da PDR ao longo dos raios.

Para ilustrar a comparação da eficiência energética dos algoritmos propostos com o ADR, a Tabela III mostra o consumo médio dos dispositivos, em Joules, para cada raio de cobertura simulado, comparando o consumo do ADR com o vetor \vec{a} de melhor desempenho, isto é, de maior PDR.

O ADR apresenta menor consumo que os \vec{a} para os raios menores pelo fato de priorizar a alocação dos dispositivos em SFs menores, o que garante menor consumo. A partir de 5 km, os vetores \vec{a} consomem menos energia que o ADR. Relacionando com a Figura 5, é possível concluir que, para raios igual ou maior que 4 km, o ADR apresenta maior consumo simultaneamente com menor PDR, o que evidencia que é possível encontrar proporções de alocação melhores do que a proposta pelo padrão LoRaWAN.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou alocações de SF e potência baseadas na presença ou não da linha de visada. Para isso utilizou-se

dados obtidos a partir de uma campanha de medição. A partir do processamento destes dados, modelos de perda de percurso para canais LOS e NLOS foram encontrados para aplicação no simulador de rede ns-3.

Foram comparadas propostas de alocação de SF mais simples, baseadas na proporção de EDs por SF, com o algoritmo de alocação do padrão LoRaWAN. Os resultados evidenciaram a importância da alocação adequada de SF em função da presença de linha de visada. Além disso, observou-se que o ADR, por tentar garantir o nível mínimo de potência recebida em função da sensibilidade para cada ED, apresentou desempenho abaixo dos algoritmos propostos nesse trabalho. Essa análise reforçou a hipótese de que propostas baseadas no vetor de alocação \vec{a} podem alcançar resultados com ganho considerável de desempenho em relação ao ADR.

Um possível trabalho futuro é uma investigação do uso de aprendizado de máquina para a escolha do melhor \vec{a} possível para diferentes configurações de canal e raios de cobertura. Além disso, o consumo energético de cada algoritmo pode ser considerado para determinação do melhor \vec{a} , uma vez que o consumo excessivo de uma rede LoRaWAN pode inviabilizar o seu uso em aplicações de Internet das Coisas.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Magrin, "Network level performances of a lora system," Master's thesis, Università di Padova, 2016.
- [2] L. Oliveira, et al., "Identificação Inteligente de Linha de Visada em Redes LoRaWAN," in *XLII Simp. Bras. de Telecom. e Proc. de Sinais - SBrT 2024*, 2024.
- [3] R. Aleksiejunas, et al., "Statistical los/nlos channel model for simulations of next generation 3gpp networks," *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 24, no. 10, 2018.
- [4] S. Yarkan and H. Arslan, "Identification of los and nlos for wireless transmission," in *Intern. Conf. on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications*, 07 2006, pp. 1 – 5.
- [5] L. L. de Oliveira, "Identificação inteligente los/nlos lorawan ufjf," in Disponível: <https://github.com/lucas-lima99>, 2024.
- [6] J. Isabona, et al., "Path loss and models: A survey and future perspective for wireless communication networks," *International Journal of Advanced Networking and Applications*, vol. 15, p. 5892–5907, 2023.
- [7] R. E. Nkrow, et al., "NLOS Identification and Mitigation for Time-based Indoor Localization Systems: Survey and Future Research Directions," *ACM Comput. Surv.*, vol. 56, no. 12, Oct. 2024.
- [8] Z. Wei, et al., "An intelligent path loss prediction approach based on integrated sensing and communications for future vehicular networks," *IEEE Open Journal of the Computer Society*, vol. PP, pp. 1–11, 01 2024.
- [9] A. Bombino, et al., "Machine learning-aided classification of los/nlos radio links in industrial iot," in *2020 16th IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS)*, 2020, pp. 1–8.
- [10] R. Macêdo, et al., "Modelagem inteligente de perda de percurso utilizando transceptores lora," in *XXXVII Simp. Bras. de Telecom. e Proc. de Sinais - SBrT 2019*, 2019.
- [11] A. Fonseca, et al., "Perda de Percurso para Redes LoRaWAN em Ambientes Compostos," in *XLII Simp. Bras. de Telecom. e Proc. de Sinais - SBrT 2024*, 2024.
- [12] L. Costa Filho, et al., "Spreading Factor Assignment Strategy for Coverage and Capacity Flexible Tradeoff," *Journal of Communications and Information Systems*, vol. 37, no. 1, p. 47–51, Feb. 2022.
- [13] G. Macedo, et al., "LoRaWAN em Pecúria Inteligente: Análise de Desempenho de Algoritmos de ADR," in *XLI Simp. Bras. de Telecom. e Proc. de Sinais - SBrT 2023*, 2023.
- [14] L. de Oliveira, et al., "Alocação do fator de espalhamento e consumo de bateria em redes LoRaWAN," in *XIV Conf. Nac. em Comunicações, Redes e Segurança da Informação (ENCOM) Natal(RN)*, 2024.
- [15] A. F. Molisch, *Wireless Communications*, 2nd ed. Wiley, 2010.
- [16] S. K. Mitra, *Digital Signal Processing: A Computer Based Approach*, 1st ed. McGraw-Hill, Inc., 1997.
- [17] Semtech, *SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*, 2024.