

# Alocação Conjunta de Potência e SF em Redes LoRaWAN com Múltiplos Gateways

Willian Henrique, Arliones Hoeller, Richard Demo Souza

**Resumo**— Neste trabalho é analisado o desempenho de uma rede LoRaWAN servida por mais de um *gateway*. Os resultados quantificam a confiabilidade e o consumo energético para diferentes configurações. Também é proposto um algoritmo que aloca o fator de espalhamento e a potência de transmissão em uma rede com múltiplos *gateways*, para uma taxa de sucesso alvo. O algoritmo proposto consegue diminuir consideravelmente o consumo quando comparado com uma solução de referência que não explora a diversidade de *gateways* adequadamente.

**Palavras-Chave**— LoRaWAN, IoT, Consumo, Diversidade

**Abstract**— This work analyzes the performance of a LoRAWAN network with multiple gateways. The results focus on the reliability and power consumption under different configurations. We also propose an algorithm that allocates spreading factor and transmit power in a network with multiple gateways ensuring a reliability target. The proposed algorithm can considerably decrease the power consumption, while meeting the target reliability, when compared to a reference case that does not exploit the gateway diversity adequately.

**Keywords**— LoRaWAN, IoT, Consumption, Diversity

## I. INTRODUÇÃO

O mercado de *Internet das Coisas* (IoT) vem crescendo muito nos últimos anos. De acordo com [1], o número de dispositivos conectados passará de 7 bilhões em 2017 para 25 bilhões em 2025. Isto será possível, em parte, pela redução de custo dos componentes. Por exemplo, o preço médio de um sensor para IoT baixou de US\$ 1,30 em 2004 para US\$ 0,38 em 2019, e o preço médio para transferir 1GB de dados foi de US\$ 0,478 em 2014 para US\$ 0,044 em 2019 [1]. De acordo com [2], o mercado de IoT tem potencial para um impacto econômico no ano de 2025 entre US\$ 3,9 e 11 trilhões, contribuindo com aproximadamente 4 e 11 por cento do PIB global.

Entre as muitas aplicações da IoT, uma parcela relevante são aquelas que necessitam de redes com baixo consumo e longo alcance (LPWANs, do inglês *Low-Power Wide Area Networks*) [3]. Entre as tecnologias LPWAN com sucesso comercial podemos listar LoRa/LoRaWAN, SigFox, LTE-M e NB-IoT [4], tornando economicamente viáveis várias aplicações de sensores e atuadores para, *e.g.*, *SmartCity*, *Smart-Building*, agricultura e Indústria 4.0. Dentre as tecnologias acima, destacamos LoRa/LoRaWAN [5], que tem atraído muito interesse na indústria e na academia. LoRa/LoRaWAN

Willian Henrique, Instituto SENAI de Inovação em Sistemas Embarcados, Florianópolis-SC, e-mail: willian.henrique@sc.senai.br; Arliones Hoeller, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), São José-SC, e-mail: arliones.hoeller@ifsc.edu.br; Richard Demo Souza, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis-SC, e-mail: richard.demo@ufsc.br. Este trabalho foi financiado por SENAI e CNPq.

é a combinação de LoRa, uma camada física de comunicação proprietária da Semtech, e LoRaWAN, um protocolo de rede aberto desenvolvido e mantido pela LoRa Alliance [6]. Dois problemas típicos de redes LoRaWAN, e também de todas as tecnologias LPWAN, são a cobertura da rede e o consumo energético dos nós. É interessante que a cobertura seja a maior possível enquanto o consumo seja o menor possível, otimizando os objetivos originais de uma rede LPWAN.

## A. Revisão da Literatura

Petajajarvi *et al.* [7] mediram a cobertura de uma rede LoRaWAN na cidade de Oulu, na Finlândia. A análise é realizada em ambiente marinho (na superfície) e terrestre, onde foi possível obter, com 60% de taxa de sucesso, alcances de até 30km em ambiente marinho e 10 km em ambiente terrestre. Centenaro *et al.* [5] realizam uma análise semelhante, mas focada em ambiente urbano na cidade de Padova, na Itália, com área aproximada de 100km<sup>2</sup>. Nas estimativas dos autores, são necessários apenas 30 *gateways* para cobrir a cidade.

Uma análise matemática sobre redes LoRaWAN é realizada em [8], onde são obtidas equações de probabilidade de colisão de pacotes, levando em consideração um único *gateway*. Uma investigação do comportamento de um *gateway* com múltiplas antenas e do efeito de replicação de mensagens é apresentado em [9], concluindo que replicações são vantajosas apenas para redes de densidade limitada. Mahmood *et al.* [10] analisam a interferência de pacotes utilizando fatores de espalhamento (SF) diferentes, concluindo que a maior causa de colisão é a interferência intra SF. Croce *et al.* [11] apresentam resultados sobre a interferência entre SFs. Sua análise utiliza métodos numéricos e experimentais, concluindo que na média a ortogonalidade entre SFs é garantida se a potência recebida dos sinais com SFs diferentes tem até 16dB de variação.

Para definir o SF e a potência de transmissão dos nós de forma dinâmica, o protocolo LoRaWAN utiliza o algoritmo *Adaptive Data Rate* (ADR), que tem como objetivo melhorar o consumo de energia e a capacidade total da rede [6]. Por sua natureza dinâmica e lento tempo de resposta, o ADR muitas vezes tem dificuldade de obter uma boa configuração para a rede [12]. Alternativamente, é possível definir tais parâmetros de forma antecipada, quando a posição e o número de nós são conhecidos, portanto na etapa de planejamento. Nesta linha, Abdelfadeel *et al.* [13] apresentam um método de definição de potência de transmissão e SF que equilibra a taxa de sucesso (DER, do inglês *Data Extracation Rate*) dos nós. Zhou *et al.* [14] apresentam outro algoritmo para definição dos parâmetros da rede, que ajusta a taxa de transmissão e o

balanceamento de carga, e que é capaz de suportar mais nós que o ADR. Por fim, Cuomo *et al.* [15] apresentam o algoritmo EXPLoRa, com diferentes abordagens de alocação de SF, uma que considera a distribuição dos nós ao redor do *gateway* e outra que equaliza o tempo que os nós da rede com mesmo SF utilizam o canal, chamada de EXPLoRa-AT. Esta última estratégia é a mais robusta, obtendo bons resultados quando vários SFs precisam ser utilizados para garantir cobertura a todos os nós, superando o desempenho do algoritmo ADR.

### B. Contribuição

Uma questão comum aos trabalhos acima é que não exploram diretamente a existência de múltiplos *gateways* na adaptação dos parâmetros de modo a garantir ao mesmo tempo confiabilidade e menor consumo. Neste trabalho, procuramos preencher este espaço, propondo uma variação do algoritmo EXPLoRa-AT que considera justamente o efeito de múltiplos *gateways*. Em um cenário com 4000 metros de raio e 2 *gateways*, ao utilizar o algoritmo proposto é observada redução de 27,4% no consumo de energia em relação ao caso que não explora diversidade de *gateways* adequadamente. Reduções significativas também são obtidas em outros cenários.

O restante deste artigo é organizado da seguinte maneira. Na Seção II é apresentado um resumo de LoRa e LoRaWAN. Na Seção III é exposto o modelo do sistema, o modelo de cobertura da rede, e o consumo energético. Na Seção IV é apresentado o algoritmo proposto. Na Seção V são discutidos resultados numéricos, enquanto a Seção VI conclui o artigo.

## II. LORA/LORAWAN

LoRa é uma tecnologia de camada física que utiliza *Chirp Spread Spectrum* (CSS), uma técnica de espalhamento espectral patenteada e explorada pela Semtech [16]. Um parâmetro importante desta modulação é o SF, que pode variar de 7 a 12. O SF impacta diretamente no tempo de duração dos símbolos,  $T = \frac{2^{SF}}{B}$ , onde  $B$  é a largura de banda. Quanto maior o SF, menor é a taxa de transmissão e maior é o consumo de energia. Sinais transmitidos com SFs diferentes são praticamente ortogonais, possibilitando que sinais enviados em uma mesma frequência e SFs diferentes possam ser decodificados pelo *gateway*. A largura de banda normalmente utilizada pelos nós é de  $B = 125\text{kHz}$ .

LoRaWAN é um protocolo que gerencia as trocas de mensagens usando modulação LoRa. É responsável por gerenciar as conexões dos nós com o *gateway* até o envio da informação para o servidor de rede. O *gateway* tem o papel de encaminhar as mensagens para o servidor, onde são processadas. Mais de um *gateway* pode estar conectado ao mesmo servidor. Assim, uma mensagem pode ser recebida no servidor através de mais de um *gateway*, sendo que o servidor trata os casos de multiplicidade. Dessa forma, os *gateways* são transparentes para os nós, sua conexão é com o servidor de rede.

Os nós podem ser das Classes A, B e C. Neste trabalho é considerada a Classe A, a mais comum. Nesta classe o rádio fica em modo *sleep* a maior parte do tempo, tornando-a a classe que menos consome energia. Transmissões são feitas usando protocolo ALOHA, portanto sem verificar se o canal

está em uso. Após a transmissão e um período em estado *idle*, o nó abre uma ou duas janelas de recepção, em que o servidor pode enviar informações para o nó.

## III. MODELO DO SISTEMA

Seguindo [8], os  $N$  nós estão uniformemente distribuídos em um círculo de raio  $R$ . Dado o sinal  $s_1$  enviado por um nó de referência, o sinal recebido pelo *gateway* é

$$r_1 = \sqrt{\mathcal{P}_1 g_1} h_1 s_1 + \sum_{i=2}^N X_i^{SF} \sqrt{\mathcal{P}_i g_i} h_i s_i + n, \quad (1)$$

onde  $g_i = \left(\frac{\lambda}{4\pi d_i}\right)^\alpha$ ,  $\lambda$  é o comprimento de onda,  $d_i$  é a distância do  $i$ -ésimo nó até o *gateway*,  $\alpha$  é o expoente de perda de propagação;  $h_i$  é *fading* Rayleigh;  $X_i^{SF}$  é uma função binária, igual a 1 se o  $i$ -ésimo nó transmite no mesmo tempo e SF que o nó de referência;  $s_i$  é o sinal transmitido pelo  $i$ -ésimo nó com potência  $\mathcal{P}_i$ ;  $n$  é ruído Gaussiano com média zero e variância  $\mathcal{N} = -174 + NF + 10 \log_{10} B$  dBm, e  $NF$  é a figura de ruído do *gateway*. A probabilidade de sucesso na comunicação segue [8], e leva em consideração a falta de conexão entre o nó e o *gateway*, e a colisão de pacotes.

Uma falha de conexão ocorre quando o sinal recebido pelo *gateway* tem razão sinal ruído (SNR) inferior à mínima necessária, que depende do SF sendo utilizado. Assim, a probabilidade de conexão pode ser descrita como:

$$H_1 = \mathbb{P}[\text{SNR} \geq q_{SF} | d_1], \quad (2)$$

onde  $q_{SF}$  é a SNR mínima para decodificar a mensagem utilizando um dado SF. Para o caso de *fading* Rayleigh,

$$H_1 = \mathbb{P}\left[|h_1|^2 \geq \frac{\mathcal{N} q_{SF}}{\mathcal{P}_1 g_1} | d_1\right] = \exp\left(-\frac{\mathcal{N} q_{SF}}{\mathcal{P}_1 g_1}\right). \quad (3)$$

Uma colisão ocorre quando ao menos dois nós transmitem ao mesmo tempo no mesmo SF. Porém, caso o pacote transmitido pelo nó de referência tenha sido recebido com potência ao menos 6dB maior do que o interferente mais forte ( $i^*$ ), então ele poderá ser *capturado* pelo *gateway*, resolvendo a colisão.

A probabilidade de captura pode ser definida então como

$$Q_1 = \mathbb{P}\left[\frac{|h_1|^2 g(d_1)}{|h_{i^*}|^2 g(d_{i^*})} \geq 4 \mid d_1\right], \quad (4)$$

cujas soluções exata e aproximada podem ser encontradas em [3], [9].

Probabilidade de cobertura é a probabilidade de um nó conseguir enviar seu pacote com sucesso a um *gateway*. Aproximando os eventos  $C_1$  e  $Q_1$  como independentes, então modelamos a probabilidade de cobertura como [3], [9]

$$C_1 = H_1 Q_1. \quad (5)$$

Assumimos que a frequência de geração de mensagens dos nós são iguais, pois eles operam segundo a mesma aplicação. Ademais, para os nós utilizando SF12 consideramos que eles transmitem por 1% do tempo apenas, o que está dentro dos limites legais em boa parte do mundo [17]. Pacotes enviados com SF7 têm tempo no ar menor que com SF12, e portanto nós com SF7 ficam mais tempo em modo *sleep* do que nós com SFs maiores. Esta relação é ilustrada na Figura 1.

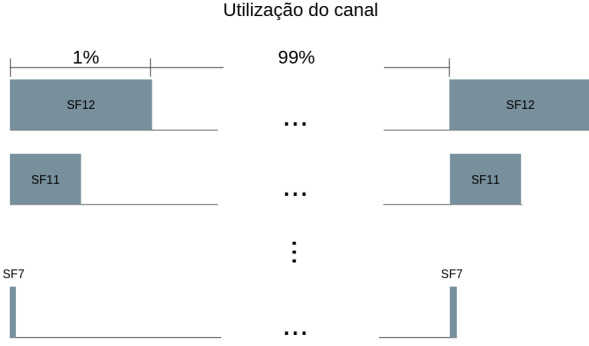


Fig. 1: Utilização do canal para cada SF.

### A. Alocação de SF

É possível atribuir os SFs de modo a diminuir a colisão de pacotes e aumentar a probabilidade de sucesso das transmissões. O protocolo LoRaWAN [6] utiliza o ADR, que considera a SNR vista no *gateway* como principal parâmetro de definição de SF e potência dos nós, operando de forma dinâmica e subótima [15]. Se após uma série de medições a SNR média estiver acima de uma margem do limiar  $q_{SF}$ , o SF ou a potência serão diminuídos, focando em reduzir o consumo. O algoritmo EXPLoRa-AT [15], por sua vez, é aplicado no momento de planejamento da rede, e propõe igualar o tempo no ar dos SFs, focando em reduzir as colisões, mas não aloca potência. Neste trabalho será proposta uma adaptação do algoritmo EXPLoRa-AT para múltiplos *gateways*, com adaptação de potência.

### B. Consumo de Energia

Neste trabalho a análise do consumo leva em consideração o dispositivo SX1276 da Semtech [18]. Este rádio possui modos de operação *sleep*, *idle*, e *rx*, com consumo de corrente  $I_{\text{sleep}} = 0, 2\mu\text{A}$ ,  $I_{\text{idle}} = 1.5\mu\text{A}$  e  $I_{\text{rx}} = 10.8\text{mA}$ . O consumo no modo *tx* está entre  $I_{\text{tx}} = 22\text{mA}$  e  $125\text{mA}$  para potências de transmissão de 0dBm a 20dBm. O SF influencia o consumo de energia uma vez que, quanto maior o SF, maior o tempo de transmissão. O consumo total de energia inclui os estados *sleep* e ativos,

$$E_{\text{total}} = E_{\text{sleep}} + E_{\text{ativo}}. \quad (6)$$

O estado ativo compreende os modos *tx*, *idle* e *rx*, e que são utilizados quando o nó transmite um pacote de dados, portanto  $E_{\text{ativo}} = E_{\text{tx}} + E_{\text{idle}} + E_{\text{rx}}$ . Neste trabalho é assumida uma janela de *rx* com 500ms e uma de *idle* com 1000ms, considerando que o recebimento tem sucesso na primeira janela [6], e tensão de alimentação de  $V = 3, 3 \text{ V}$ . Assim,

$$E_{\text{ativo}} = t_{\text{tx}}(I_{\text{tx}} \cdot V) + t_{\text{idle}}(I_{\text{idle}} \cdot V) + t_{\text{rx}}(I_{\text{rx}} \cdot V), \quad (7)$$

onde  $t_{\text{tx}}$ ,  $t_{\text{idle}}$ , e  $t_{\text{rx}}$  são os tempos nos modos correspondentes.

## IV. MÉTODO PROPOSTO

Uma solução comumente apontada para melhorar o desempenho de redes LoRaWAN, tanto em termos de taxa de sucesso de comunicação como em consumo de energia dos dispositivos, é aumentar a densidade de *gateways*. Assim

os nós terão um enlace de comunicação mais curto e terão diversidade espacial, possibilitando diminuir sua potência de transmissão e SF, potencialmente reduzindo a probabilidade de colisão e o consumo de energia.

O método proposto é inspirado no EXPLoRa-AT, porém se diferencia por explorar os múltiplos *gateways* para reduzir o consumo dos nós, dada uma DER alvo. Note que o método EXPLoRa-AT original não aloca potência, e por conta disso não permite o projeto para uma DER alvo específica. A definição da potência e do SF do nó são feitas em função da probabilidade de conexão. É importante notar que, em uma rede com múltiplos *gateways*, a diversidade espacial melhora a probabilidade de conexão. Se for levado em consideração somente o *gateway* mais próximo para determinar  $\mathcal{P}_i$  e SF de cada nó, haverá sobreuso de potência. Considerando o efeito da diversidade de *gateways*, é possível reduzir  $\mathcal{P}_i$  ou SF sem prejuízo à taxa de sucesso, economizando energia.

Por exemplo, numa rede com  $K$  *gateways* a probabilidade de conexão não é mais dada por (3), mas por

$$H_1^K = 1 - \prod_{k=1}^K (1 - H_{1k}), \quad (8)$$

onde  $H_{1k}$  é a probabilidade de conexão do nó com o  $k$ -ésimo *gateway*, os quais geralmente estão a diferentes distâncias do nó. Em geral,  $H_1^K \geq H_1$ , e portanto é possível operar com menor potência ou SF no caso de  $K$  *gateways* do que de um único *gateway*. Discussão semelhante pode ser feita para o caso da probabilidade de captura  $Q_1$ .

### A. Algoritmo Proposto

O Algoritmo 1 define os parâmetros que serão alocados aos nós quando a rede utiliza o método proposto, que é baseado no EXPLoRa-AT e na diversidade de *gateways*. Como entrada é utilizada a posição do nó (que na prática pode ser substituída pela SNR média), a posição dos *gateways*, o número total de nós da rede e um alvo para  $H_1$ . Como saída o algoritmo retorna a potência de transmissão e SF para cada nó. A variável global para armazenar a quantidade de nós já alocados em cada SF é *nos\_SF*. Ao inicializar o algoritmo é definida a constante *ToA* que contém o tempo no ar normalizado para os diferentes SFs assumindo todos os nós executando a mesma aplicação, independente de tamanho de pacote. Após, são definidas as variáveis *SF* e *potência*, considerando inicialmente o pior caso do ponto de vista de consumo. O laço que itera entre os SFs começa pelo SF7, e calcula o máximo de nós que podem ser alocados no dado SF, tentando deixar a utilização total dos SFs iguais. Após, é verificado se a quantidade de nós alocados no dado SF já chegou ao limite. Caso afirmativo, parte-se para o próximo SF. Caso seja possível alocar mais nós naquele SF, é calculada a potência para atender o valor de  $H_1$  alvo usando (8). Se esta potência é menor que o limite estabelecido, então o SF e a potência de transmissão foram encontrados. Se esta potência é maior que o máximo permitido, então é analisado o próximo SF. No caso do algoritmo não encontrar uma potência e/ou SF para o nó, é atribuída a potência máxima e o SF12. O algoritmo começa pelos nós mais próximos ao *gateway* e assim sucessivamente. O valor alvo de  $H_1$  deve ser

maior do que o valor de DER ( $C_1$ ) desejado, e requer um laço externo de testes de diferentes  $H_1$  alvo até que a DER desejada seja encontrada dentro de alguma tolerância.

---

**Algoritmo 1:** DEFINIÇÃO DE SF E POTÊNCIA.
 

---

**Entrada:** Posição do nós e gateways,  $H_1$  alvo  
**Saída:** Potência, SF

```

1   $nos\_SF \leftarrow \{0, 0, 0, 0, 0, 0\}$ 
2  início
3   $ToA \leftarrow [1.0, 1.8, 3.601, 7.203, 13.104, 24.033]$ 
4   $ToA\_sum \leftarrow \sum_j (ToA[j]^{-1})$ 
5  para  $no \in \{1, 2, \dots, num\_nos\}$  faça
6       $SF[no] \leftarrow 12$ 
7       $P[no] \leftarrow 14$ 
8      para  $j \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$  faça
9           $max\_nos\_SF \leftarrow \lfloor num\_nos \times \frac{ToA[j]^{-1}}{ToA\_sum} \rfloor$ 
10         se  $max\_nos\_SF < nos\_SF[j]$  então
11              $temp \leftarrow potencia_{H_1\_alvo}(H_1\_alvo,$ 
12                  $posicao\_no, posicao\_gws, SF\ 7 + j)$ 
13             se  $temp < max\_potencia$  então
14                  $nos\_SF[j] \leftarrow nos\_SF[j] + 1$ 
15                  $SF[no] \leftarrow 7 + j$ 
16                  $P[no] \leftarrow temp$ 
17                 break
18             fim
19         fim
20     fim
21 fim
22 fim
    
```

---

Para efeito de comparação, consideramos como referência uma versão do método proposto em que a potência de transmissão é calculada a partir da probabilidade de conexão com o gateway mais próximo, sem explorar diversidade espacial (i.e. usando (3) ao invés de (8) no cálculo da potência do nó).

## V. RESULTADOS

Investigamos por simulação o consumo de energia médio para transmitir pacotes de 25 bytes, considerando os métodos proposto e de referência, em uma rede com  $N = 500$  nós e com potência entre 2 e 14dBm, com passos de 1dB. Os gateways são espalhados simetricamente em torno do centro. A frequência de portadora é 868MHz,  $\alpha = 2.75$  e  $NF = 6$ dB.

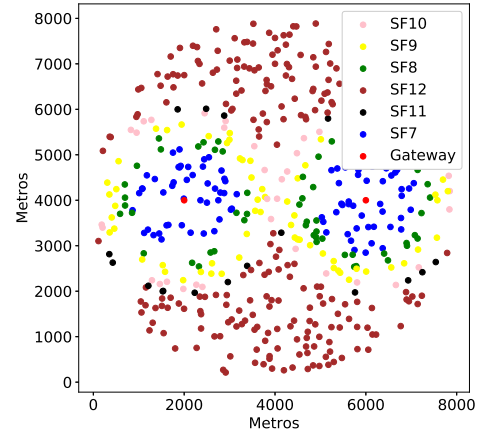
As Tabelas I e II apresentam o consumo para redes com  $R \in \{3, 4\}$  km,  $K \in \{2, 4\}$  gateways, e diferentes DER alvo, além da economia no consumo médio da rede decorrente da utilização da estratégia proposta em relação à referência. Nas realizações com  $R = 3$ km a redução do consumo foi significativa para  $K = 2$  e DER 0,85 (37,2%), assim como

TABELA I: Consumo Médio para  $R = 3$ km.

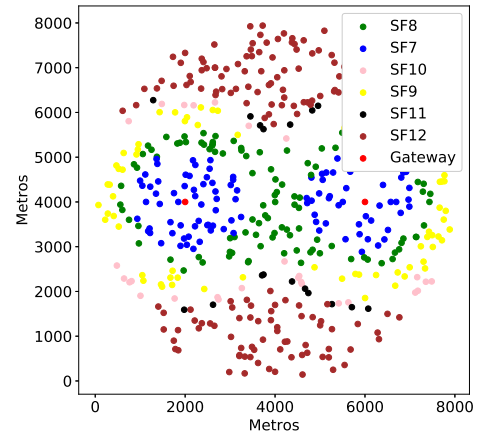
K	DER	Referência	Proposto	Economia
2	0,8	40,48 mJ	39,78 mJ	1,7%
2	0,85	64,89 mJ	40,73 mJ	37,2%
4	0,9	38,59 mJ	38,21 mJ	1,0%
4	0,95	64,76 mJ	39,46 mJ	39,1%

TABELA II: Consumo Médio para  $R = 4$ km.

K	DER	Referência	Proposto	Economia
2	0,75	61,74 mJ	47,96 mJ	22,3%
2	0,8	110,35 mJ	80,13 mJ	27,4%
4	0,85	40,05 mJ	39,20 mJ	2,1%
4	0,9	51,22 mJ	47,45 mJ	7,4%



(a) Referência.

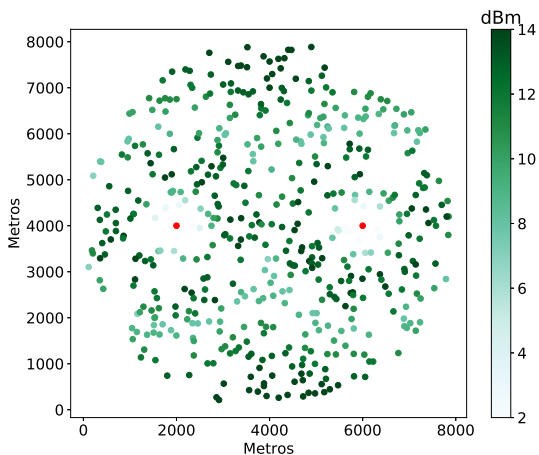


(b) Proposto.

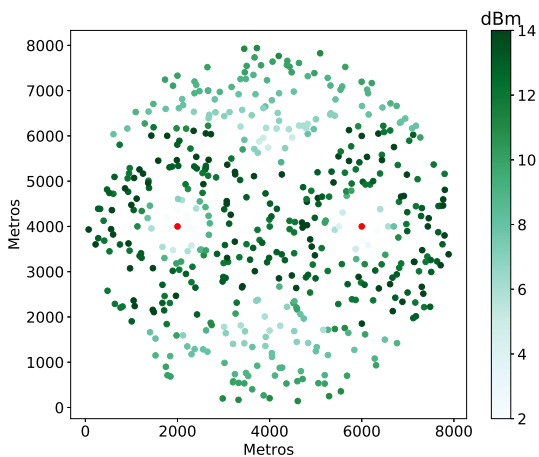
Fig. 2: SF Alocado:  $R = 4$ km,  $K = 2$ , DER 0,8.

para  $K = 4$  e DER 0,95 (39,1%). Já para os outros dois casos, em que a DER alvo era menor, a redução no consumo foi significativamente menor. Isto é devido ao fato de que nestas configurações é fácil atingir a DER alvo e a alocação proposta impacta menos. O cenário com  $R = 4$ km também apresenta ganhos, especialmente para  $K = 2$ . Por fim, fica claro que quanto mais desafiador for para atingir a DER alvo maior será o impacto da exploração da diversidade pelo método proposto.

As Figuras 2 e 3 ilustram a alocação de SF e potência para  $R = 4$ km, DER 0,8,  $K = 2$ , para os casos referência e proposto. Podemos ver que a estratégia proposta é capaz de alocar mais nós nos SFs menores, o que tem um impacto importante no consumo, além de usar menos potência de



(a) Referência.



(b) Proposto.

Fig. 3: Potência alocada:  $R = 4\text{km}$ ,  $K = 2$ , DER 0,8.

transmissão, gerando uma alocação final mais eficiente.

#### A. Discussão

O método proposto aproveita a existência de múltiplas *gateways* na região de cobertura para ser mais agressivo na alocação de potência. Isto permite uma economia no consumo e consequentemente um aumento no tempo de vida dos nós. Tal efeito também pode ser obtido se a ideia for aplicada em outros algoritmos de alocação de parâmetros, aqueles derivados do EXPLoRa ou de outras propostas. Portanto, a ideia, apesar de simples, é eficaz e generalizável.

É importante ressaltar que a proposta prevê a otimização dos parâmetros dos nós no planejamento da rede, não na operação. No caso de redes que não permitem otimização na etapa de planejamento, a técnica mais utilizada é o ADR. A proposta apresentada neste artigo não pode ser diretamente aplicada ao ADR, porém traz importantes conhecimentos que podem ser aplicados ao ADR. O mais importante é que o parâmetro de margem em relação à sensibilidade de cada SF, um fator muito relevante na operação do ADR [6], [12], poderia ser adaptado

por nó em função do número de *gateways* que são capazes de receber os pacotes deste nó. Não conhecemos na literatura alguma proposta que faça esta adaptação e, dados os resultados acima, é importante investigar este ponto pois os ganhos de consumo e desempenho podem ser significativos.

## VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho exploramos a existência de múltiplas *gateways* no processo de definição do SF e da potência de transmissão dos nós de uma rede LoRaWAN. O foco da análise foi o consumo energético para atingir uma certa taxa de sucesso (DER) alvo. Quando comparado com uma versão do método que não explora a diversidade de *gateways*, o método proposto foi capaz de economizar uma quantidade importante de energia sem perder desempenho, aumentando o tempo de vida da rede, sem complexidade adicional significativa.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Saluja R. Rishi. Future of IoT. *Ernst & Young, Federation of Indian Chambers of Commerce and Industry (FICCI)*, 2019.
- [2] J. Manyika, M. Chui, P. Bisson, J. Woetzel, J. Bughin, and D. Aharo. *The Internet of Things: Mapping the Value Beyond the Hype*. McKinsey Global Institute, June 2015.
- [3] U. Raza, P. Kulkarni, and M. Sooriyabandara. Low power wide area networks: An overview. *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, 19(2):855–873, Secondquarter 2017.
- [4] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, and F. Meyer. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1):1–7, 2019.
- [5] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, and M. Zorzi. Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios. *IEEE Wirel. Commun.*, 23(5):60–67, 2016.
- [6] LoRa-Alliance. *LoRaWAN 1.0.3 Specification*, 2018.
- [7] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hanninen, and M. Pettissalo. On the coverage of LPWANs: Range evaluation and channel attenuation model for LoRa technology. In *Proc. of the International Conference on ITS Telecommunications*, pages 55–59, 2015.
- [8] O. Georgiou and U. Raza. Low power wide area network analysis: Can LoRa scale? *IEEE Wireless Commun. Lett.*, 6(2):162–165, 2017.
- [9] A. Hoeller, R. D. Souza, O. L. A. López, H. Alves, M. Noronha-Neto, and G. Brante. Analysis and performance optimization of LoRa networks with time and antenna diversity. *IEEE Access*, 6:32820–32829, 2018.
- [10] A. Mahmood, E. Sisinni, L. Guntupalli, R. Rondón, S. A. Hassan, and M. Gidlund. Scalability analysis of a LoRa network under imperfect orthogonality. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 15(3):1425–1436, 2019.
- [11] D. Croce, M. Gucciardo, S. Mangione, G. Santaromita, and I. Tinnirello. Impact of LoRa imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance. *IEEE Commun. Lett.*, 22(4):796–799, 2018.
- [12] S. Li, U. Raza, and A. Khan. How agile is the adaptive data rate mechanism of LoRaWAN? In *Proc. of the IEEE Global Communications Conference*, pages 1–6, Dec 2018.
- [13] K. Q. Abdelfadeel, V. Cionca, and D. Pesch. Fair adaptive data rate allocation and power control in LoRaWAN. In *Proc. of the IEEE International Symposium "A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks"*, pages 1–9, Jun 2018.
- [14] Q. Zhou, J. Xing, L. Hou, R. Xu, and K. Zheng. A novel rate and channel control scheme based on data extraction rate for LoRa networks. In *Proc. of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pages 1–6, Apr 2019.
- [15] F. Cuomo, M. Campo, A. Caponi, G. Bianchi, G. Rossini, and P. Pisani. EXPLoRa: Extending the performance of LoRa by suitable spreading factor allocations. In *Proc. of the IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pages 1–8, Nov 2017.
- [16] Semtech Corporation. *AN120.22 LoRa Modulation Basics*, Mar 2015.
- [17] LoRa-Alliance. *LoRaWAN Regional Parameters RP002-1.0.0*, 2019.
- [18] Semtech. *SX1276/77/78/79 - 137 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver*, 2019.