

# Otimização de Recursos de Rádio em Dispositivos LoRa Utilizando Programação Linear: Uma Abordagem para Eficiência Energética e Longevidade da Bateria em Redes 6G

Rayane Araújo Lima<sup>1</sup>, Maria Ribeiro<sup>2,3</sup> e Antonio Oliveira-Jr<sup>1,4</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Informática (INF) – Universidade Federal de Goiás (UFG)

<sup>2</sup>Institute for Systems and Computer Engineering, Technology and Science (INESC-TEC)

<sup>3</sup>Faculdade de Informação e Comunicação (FIC) – Universidade Federal de Goiás (UFG)

<sup>4</sup>Fraunhofer Portugal AICOS

rayane\_lima@discente.ufg.br, rosarioribeiro@ufg.br e antoniojr@ufg.br

**Abstract.** *Efficient radio resource management is of paramount importance to ensure prolonged battery life in LoRa devices. This article presents an innovative approach to optimizing radio resources in LoRa devices, with a specific focus on energy efficiency and battery longevity in the context of 6G networks. By applying integer linear programming techniques, the allocation of essential resources, such as Spreading Factor (SF) and Transmission Power (TP), is strategically enhanced. Realistic scenarios are considered, incorporating multiple gateways, diverse nodes, SF-related interferences, interference zones, and other practical features. We emphasize the relevance of adopting realistic scenarios for determining SFs and TPs, aiming to maximize energy efficiency and adhere to the critical packet delivery rate metric.*

**Resumo.** *O eficiente gerenciamento dos recursos de rádio é de suma importância para garantir uma prolongada vida útil da bateria em dispositivos LoRa. Este artigo apresenta uma abordagem inovadora para otimizar recursos de rádio em dispositivos LoRa, com um foco específico na eficiência energética e na longevidade da bateria em contextos de redes 6G. Através da aplicação da técnica de programação linear inteira, a alocação de recursos essenciais, como o Fator de Espalhamento (SF) e a Potência de Transmissão (TP), é aprimorada de maneira estratégica. São considerados cenários realistas que incorporam múltiplos gateways, variados nós, interferências relacionadas aos SFs, zonas de interferência e outras características práticas. Ressaltamos a relevância de adotar cenários realistas para a determinação de SFs e TPs, visando a maximização da eficiência energética e a observância da métrica crítica de taxa de entrega de pacotes.*

## 1. Introdução

Um dos principais pilares das futuras redes móveis 6G é o aumento significativo de dispositivos IoTs conectados [Lv et al. 2021]. A Internet das Coisas (*Internet of Things*-IoT) abarca uma variedade de aplicações, desde cidades inteligentes até realidade aumentada/virtual, veículos conectados, jogos online e a indústria 5.0, todas envolvendo a

comunicação entre inúmeros dispositivos físicos. Esse crescimento exponencial de dispositivos conectados promete transformar profundamente a forma como interagimos com a tecnologia.

Uma tecnologia de destaque nesse cenário é a modulação LoRa (*Long Range*), altamente promissora para aplicações IoTs, oferecendo conectividade de longo alcance e baixo consumo de energia. Ampla na adoção, especialmente em redes de área ampla (*Low Power Wide Area Networks* - LPWAN) [Park et al. 2020], a combinação do LoRa com a camada MAC LoRaWAN se destaca como uma solução versátil, facilitando a conectividade tanto para a Internet industrial quanto para aplicações em cidades inteligentes, abrangendo áreas como medição inteligente, iluminação pública, coleta de lixo e redes inteligentes [Varsier and Schwoerer 2017, Sisinni et al. 2018, Jia et al. 2018, Mahmood et al. 2019a].

No entanto, o aumento exponencial no número de dispositivos IoTs pode potencialmente prejudicar a escalabilidade e o desempenho da rede, levando a contenções e interferências nas bandas de rádio não licenciadas [Raza et al. 2017]. Para mitigar esses problemas, é essencial otimizar alguns parâmetros de rádio em cada nó, como o fator de espalhamento (*Spreading Factor-SF*) e a potência de transmissão (*Transmission Power-TP*), os quais influenciam diretamente o alcance de comunicação.

Essa otimização torna-se especialmente crucial em ambientes urbanos, onde os dispositivos internos frequentemente enfrentam desafios como colisões e perda de mensagens. A seleção adequada do SF e TP, considerando a disposição física da rede e dos elementos, desempenha um papel crucial na garantia de um funcionamento eficiente e confiável do sistema.

Neste artigo, abordaremos a importância de combinar TP e SF para estabelecer uma estratégia de otimização destinada a maximizar a eficiência energética. Para alcançar esse objetivo, serão considerados cenários mais próximos das redes reais, incluindo múltiplos gateways, múltiplos nós, interferências causadas pelos SFs, regiões de interferência e outras características realistas.

## **2. Trabalhos Relacionados**

Em [Bankov et al. 2017] e [Croce et al. 2020] utilizam taxa geral de entrega de pacotes em uma rede (ou seja, a taxa agregada) e SF específico, respectivamente, para calcular modelos analíticos. No entanto, pesquisas que utilizam simulações de redes LoRa mostraram que uma alta taxa de entrega para um SF específico não assegura que todos os dispositivos que adotam esse mesmo SF alcancem o mesmo desempenho [Preamsankar et al. 2020]. Diversos fatores, como interferência, distância até o gateway e colisões de pacotes, podem influenciar nessa variação. Isso ressalta a importância de considerar não apenas a taxa geral de entrega, mas também a experiência individual de cada dispositivo ao optar por um determinado SF.

Em [Park et al. 2020], os autores propõem um método para minimizar o consumo de TP em relação à taxa de dados. Eles empregam aprendizado por reforço profundo para otimizar a distribuição de recursos de rede, como SF, TP e canal. Por outro lado, em [Babaki et al. 2020], os autores apresentam uma adaptação do algoritmo ADR convencional [Li et al. 2018], com o objetivo de maximizar a eficiência energética da rede

e a taxa de pacotes entregues. Sua proposta envolve a alocação dinâmica de SF e TP para cada nó da rede. Ambos os trabalhos [Park et al. 2020] e [Babaki et al. 2020] consideram apenas um gateway na rede, enquanto o trabalho [Premsankar et al. 2020] contempla múltiplos gateways na modelagem do problema, aproximando sua proposta a redes realísticas .

No artigo [Varsier and Schwoerer 2017], é descrito o aumento na perda de pacotes em redes LoRa à medida que o número de dispositivos inteligentes implantados aumenta. Além disso, [Choi et al. 2021] utiliza um algoritmo de controle de TP para maximizar a eficiência energética com base na localização e configuração de pontos de acesso (*Access Points-APs*) e equipamentos de usuário (*User Equipment-UE*). O número de APs e UEs, juntamente com os canais de propagação entre eles, também é considerado no *framework* proposto, analisando a escalabilidade do sistema.

### 3. Formulação do Problema

#### 3.1. Tecnologia LoRa

Uma rede LoRa é composta por nós finais alimentados por baterias, que se comunicam com *gateways* usando a tecnologia de modulação *chirp* de espectro espalhado. Os dispositivos enviam pacotes aos *gateways* por meio de um protocolo MAC baseado em ALOHA, e as mensagens são recebidas por todos os *gateways* dentro do alcance de comunicação [Raza et al. 2017]. Os *gateways* encaminham as mensagens para um servidor de rede central, que gerencia a rede, filtra pacotes duplicados e estabelece comunicação com servidores de aplicativos para o processamento de dados. A tecnologia LoRa permite comunicação de longa distância com baixo consumo de energia, e a escolha de diferentes SFs e TPs influencia a taxa de dados e o alcance dos dispositivos na rede, podendo melhorar a capacidade da rede e reduzir o consumo de energia [Slabicki et al. 2018].

#### 3.2. Modelo do Sistema

A rede a ser configurada consiste em *gateways*  $k \in \mathcal{K}$  LoRa e nós  $n \in \mathcal{N}$ . Para essa situação, os nós são estáticos, o que inviabiliza a mudança de localização para alcançar melhor desempenho. É importante ressaltar também que cada nó na rede pode utilizar diferentes combinações de SF  $s \in \mathcal{S}$  e TP  $p \in \mathcal{P}$  para alcançar um *gateway* específico. Para simplificar, considera-se que a perda de propagação é assumida:

$$PL_{nk} = \overline{PL}(d_0) + 10\eta \log\left(\frac{d_{nk}}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (1)$$

Consideramos o modelo de distância com desvanecimento plano, onde  $PL_{nk}$  é a perda de propagação,  $d_{nk}$  é a distância entre o nó ( $n$ ) e o *gateway* ( $k$ ),  $\overline{PL}(d_0) = 127.41\text{dB}$  é a perda de propagação média na distância de referência  $d_0 = 40\text{m}$ ,  $\eta = 2.08$  é o expoente da perda de propagação e  $X_\sigma$  é uma variável aleatória com distribuição Gaussiana de média zero e  $\sigma$  como desvio padrão, valores adotados para cenário urbano [J. Petajajarvi 2015].

A taxa de entrega de um nó pode ser avaliado considerando um nó de teste  $n$  em relação ao nó de interferência  $j \in \mathcal{J}$  (ou interferente), que é um nó diferente capaz de interferir na transmissão simultânea do nó de teste. Supondo que um pacote enviado pelo nó

de teste não é recebido por um *gateway* se um nó interferente transmitir simultaneamente com o mesmo SF. As transmissões se sobrepõem no intervalo de tempo  $T_s \leq T_s + \epsilon$ , onde  $T_s$  é o tempo de início da transmissão do nó de teste e  $\epsilon$  é um intervalo. O período de tempo interferente é referido como o momento em que um nó interferente não deve começar a transmitir durante  $2T_s$ . Com base nessas considerações, a taxa de entrega para o nó de teste com SF  $s$  pode ser calculada [Bor et al. 2016, Premsankar et al. 2020]:

$$D_n = e^{-2\lambda T_s |N_s|} \quad (2)$$

### 3.3. Descrição do Problema

A proposta tem como objetivo alocar os SFs e os TPs para todos os nós, visando garantir uma transferência confiável de mensagens com alta taxa de entrega e baixo consumo de energia. A Figura 1 ilustra o cenário com quatro nós ( $|N| = 4$ ), dois *gateways* ( $|K| = 2$ ) e seis SFs disponíveis ( $|\mathcal{S}| = 6$ ).

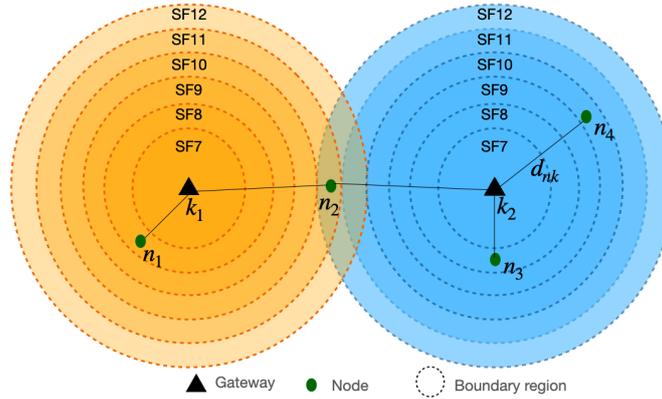


Figura 1. Cenário considerado para a formulação do problema.

Um nó pode ser configurado com diferentes SFs dependendo da região em que está localizado (SF7-SF12) com base na Figura 1. À medida que a distância do nó em relação ao *gateway* aumenta, é utilizado um SF maior. Por exemplo, na Figura 1, o nó dentro da região SF7 pode usar qualquer SF dentro do conjunto  $\{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ , enquanto a região SF8 pode utilizar qualquer SF dentro de  $\{8, 9, 10, 11, 12\}$ , e assim por diante.

Cada nó não está vinculado a um *gateway* específico, o que significa que a transmissão de um nó com determinado SF pode ser recebida por múltiplos *gateways*. Por exemplo, na Figura 1, o nó  $n_2$  pode ser configurado com SF11 e SF12. Quando configurado com SF11, a transmissão é recebida somente pelo *gateway*  $k_1$ , enquanto ambos os *gateways* podem receber as transmissões com SF12.

As transmissões com SF mais altos ocorrem em uma distância maior do *gateway*, o que resulta em um tempo mais longo para enviar um pacote. Isso aumenta o consumo de energia, uma vez que o rádio permanece em estado de transmissão (ou estado de alta energia) por um período mais extenso. Por outro lado, SFs mais baixos podem estar disponíveis apenas em TPs mais altos, o que também aumenta o consumo de energia. Portanto, é fundamental encontrar um equilíbrio entre o SF e o TP para otimizar o consumo de energia na rede.

O processo de otimização é dividido em duas etapas distintas. Na primeira etapa, o SF é determinado levando em conta diversos fatores, como distância até o *gateway*, interferência do canal e posição em relação a outros nós. A segunda etapa envolve a alocação das TPs para cada nó. Essas etapas visam aprimorar o desempenho global da rede, otimizando recursos-chave (SF e TP) para maximizar a eficiência energética. A avaliação do desempenho leva em consideração duas métricas cruciais: a taxa de entrega de dados e o consumo de energia durante a transmissão.

### 3.4. Designando SF e TP

Na Tabela 1 contém descrito o sumário das notações utilizadas. Para a configuração do sistema, adotaremos as medidas de alcance médio por *gateway* considerando os SFs e TPs em um cenário urbano (Tabela 2). Essas estimativas são apenas referências e podem variar dependendo das condições específicas do ambiente urbano em que a rede LoRa está sendo implantada.

Símbolo	Descrição
$\mathcal{S}$	Conjunto de Fatores de Espalhamento (SF)
$\mathcal{P}$	Conjunto de Potência de Transmissão (TP)
$\mathcal{K}$	Conjunto de <i>Gateways</i>
$\mathcal{I}$	Conjunto de interferências
$N$	Conjunto de nós
$P_{max}$	Potência de transmissão máxima
$P_{n,k}^r$	Potência recebida do nó $n$ no gateway $k$
$PL_{nk}$	<i>Path loss</i> entre um nó $n$ e gateway $k$
$\overline{PL}(d_o)$	Perda de propagação média para a distância $d_o$
$d_o$	Distância mínima de um certo gateway

Tabela 1. Sumário de Notações Utilizadas

Tabela 2. Alcance médio por *gateway* com base no SF e TP.

Alcance médio (m)	Possíveis SFs
0 - 500	7, 8, 9, 10, 11, 12
501 - 1000	8, 9, 10, 11, 12
1001 - 1500	9, 10, 11, 12
1501 - 2000	10, 11, 12
2001 - 2500	11, 12
2501 - 3000	12

As transmissões em diferentes SFs são quase-ortogonais, elas podem ser decodificadas corretamente, somente se o SIR (*Signal-to-interference-Ratio*) do sinal alvo estiver acima de um certo limite [Mahmood et al. 2019b], [Croce et al. 2018]. O conjunto de interferência  $\mathcal{J}_n$  para nó  $n$  usando SF  $s$  pode ser derivado:

$$\mathcal{J}_n = \{j | P_n^r - P_j^r < SIR_{s,s'}\} \quad (3)$$

O conjunto de interferência não depende exclusivamente dos SFs utilizados pelos nós, mas também é influenciado pela localização geográfica de cada nó na rede. O SF influencia tanto a taxa de bits quanto a confiabilidade da transmissão. Aumentar o SF diminui a taxa de bits, porém aumenta a confiabilidade. Em contrapartida, reduzir o SF aumenta a taxa de bits, mas reduz a confiabilidade [Reynders et al. 2017]. Assim, a seleção do SF pode ter um impacto indireto sobre a quantidade de dados transmitidos, adaptando-se às necessidades específicas de taxa de bits e confiabilidade para uma aplicação em particular. A relação entre a taxa de bits  $R_b$ , largura de banda  $B$ , SF e taxa de símbolo  $R_s$  é sumarizado em:

$$R_b = \frac{B \times s}{2^s} \quad (4)$$

A variável  $x_{n,k} \in \{0, 1\}$ , possui valor binário e garante que o nó  $n$  se conecte ao *gateway*  $k$ . Da mesma forma  $y_{n,s} \in \{0, 1\}$ , assegura que o nó  $n$  tenha um SF  $s$  atribuído. Logo, a Função Objetivo está estabelecida na Equação (5a), o objetivo é minimizar o TP  $p$  do sistema, levando em consideração as características dos dispositivos, SFs disponíveis e as distância entre dispositivos e *gateways*. Sendo assim, a Equação (7b) compõe a primeira restrição, limitando a escolha do SF com base na distância do nó em relação *gateway*, o valor do SF deve ser menor igual ao SF imposta pela distância máxima considerada para o SF, conforme Tabela 2, usando a constante  $M$ , se o nó  $n$  alcança o *gateway*  $k$ . Para manter um nível adequado de desempenho de comunicação a restrição na Equação (5c) trás uma adaptação da Equação (4), considera não apenas a taxa de bits, mas também a qualidade da taxa de bits, garantindo que o SF atribuído seja menor ou igual ao que oferece a máxima qualidade, com o fator  $\phi$  controlando a alocação de SFs menores, a eficiência energética e QoS. A Equação (5d) ajuda a compor a Equação (7b) onde, dada a distância do nó em relação ao *gateway*, um conjunto de possíveis SFs é construído. Finalmente, as Equações (5e) e (5f) certificam que o nó está conectado a um único *gateway* e possui um único SF atribuído, respectivamente.

$$\min \sum_{n \in N} \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times p \quad (5a)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{n,k} \times d \leq \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times d_{n,s_{max}} + M \cdot (1 - x_{n,k}), \quad (5b)$$

$$\forall n, s \in N, \mathcal{S}$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times (2^s) \times Q \leq \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times s \times B, \quad \forall n \in N \quad (5c)$$

$$s(n, d) = \{s | s \in \mathcal{S}, d_{n,s_{min}} \leq d \leq d_{n,s_{max}}\} \quad (5d)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_n^k = 1, \quad \forall n \in N \quad (5e)$$

$$\sum_{s_j \in \mathcal{S}} y_n^s = 1, \quad \forall n \in N \quad (5f)$$

O TP e o SF têm uma relação inversamente proporcional, conforme Tabela 3:

**Tabela 3. Potência de Transmissão - TP [Bor et al. 2016].**

SF	7	8	9	10	11	12
TP(dBm)	14	11	8	5	2	2

#### 4. Avaliação Experimental Inicial

O problema de otimização foi resolvido com o PuLP (versão 2.10.3) através de API *Python* em uma máquina com Chip M2 e 16GB de RAM. Para as etapas iniciais de análise do sistema e validação do algoritmo de otimização, a configuração envolveu a presença de dois *gateways* e 2000 nós. As distâncias entre os nós e os *gateways* são geradas pseudo-aleatoriamente no intervalo de [40, 3000], considerando-se o cenário mais desafiador de alcance em ambiente urbano. O algoritmo de otimização delineado encontra-se detalhado no Algoritmo 1.

---

##### Algorithm 1 Otimização Proposta

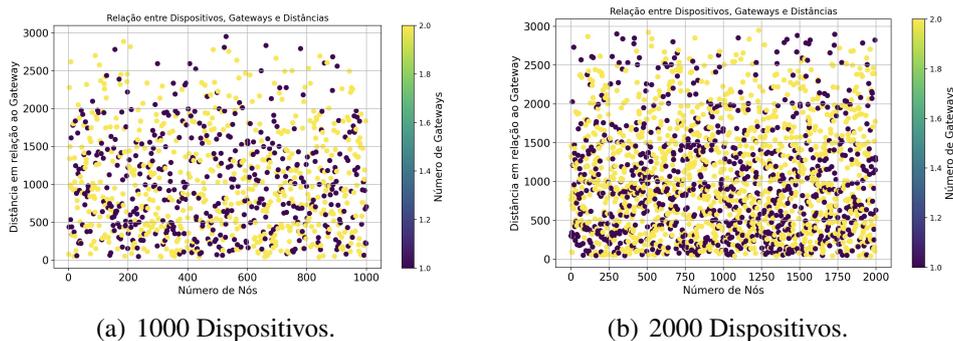
---

- 1: **Entrada:** Lista de Nós,  $n \in N$
  - 2:  $\phi$  = Fator de controle de quantidade de bist,  $0 \leq \phi \leq 1$
  - 3: B = 125 kHz (Largura de Banda)
  - 4: M = Constante de penalização
  - 5: **Saída:** SF e TP
  - 6: **for**  $n \in N$  **do**
  - 7:      $\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{n,k} = 1$
  - 8:      $\sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} = 1$
  - 9:     **for**  $k \in \mathcal{K}$  **do**
  - 10:          $\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{n,k} \times d \leq \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times d_{n,s_{max}} + M \cdot (1 - x_{n,k})$
  - 11:     **end for**
  - 12:     **for**  $s \in \mathcal{S}$  **do**
  - 13:         Qualidade da Taxa de Bits (Q):
  - 14:          $Q = R_b * \phi$
  - 15:          $\sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times (2^s) \times Q \leq \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times s \times B$
  - 16:     **end for**
  - 17: **end for**
  - 18:  $\min \sum_{n \in N} \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times p = 0$
- 

A otimização foi realizada considerando 1000 nós e 2000 nós, para validar a escalabilidade do sistema. A solução ótima para 1000 nós é alcançada após 275 iterações,

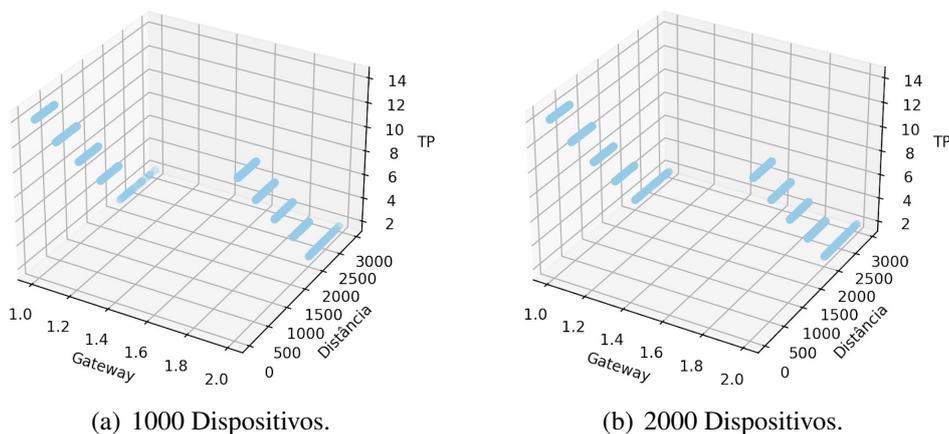
com um tempo total de execução de 85,29 s. Para 2000 nós o tempo de execução foi de 362,16s com 523 iterações.

A Figura 2 representa a seleção de gateways com base nas distâncias. Com 1000 nós, observa-se que a maioria deles está conectada ao Gateway 02 (Figura 2(a)). À medida que o número de nós aumenta para 2000, há um aumento significativo na conexão de nós com o *Gateway* 02 (Figura 2(b)). É importante notar que não há um limite de associação, portanto, a única restrição para a associação é a distância.



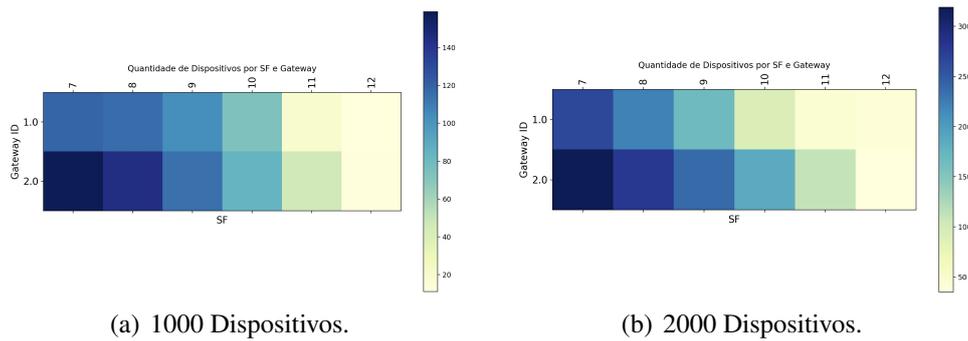
**Figura 2. Relação entre Dispositivos, Gateways e Distâncias.**

Os nós conectados ao *Gateway* 01 (Figura 3) apresentam os maiores TPs, principalmente devido à proximidade física desses nós ao *gateway*. Além disso, a qualidade dos bits ( $Q$ ) foi aplicada de forma consistente a todos os nós, considerando uma perda de pacote de 20%. É relevante observar que a alocação dos TPs ocorreu de maneira semelhante, tanto para o cenário com 1000 nós quanto para o de 2000 nós.



**Figura 3. Relação entre Distância, TP e Gateway.**

A Figura 4 apresenta a alocação das configurações de SF aos dispositivos, destacando que os SFs mais elevados foram atribuídos aos nós do Gateway 02 em ambos os casos. Inicialmente, durante a etapa de otimização, todos os nós receberam a configuração SF12, abrangendo todas as regiões. Em seguida, na segunda fase da otimização, considerou-se a qualidade dos bits entregues, ampliando a análise além da eficiência energética. É importante observar que os cenários avaliados presumiram uma cobertura completa de ambos os gateways para todos os dispositivos.



**Figura 4. Quantidade de Dispositivos por SF e Gateway.**

## 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

Apresentamos uma abordagem para otimizar a distribuição de recursos de rede em dispositivos IoT LoRa em ambientes de redes 6G, com o intuito de maximizar a eficiência energética. Nossa proposta, ainda na fase inicial, se vale da técnica de programação inteira linear para aprimorar a alocação de recursos essenciais, como SF e TP. Enfatizamos a relevância de considerar cenários realísticos ao atribuir valores de SF e TP, visando amplificar a eficiência energética da rede e considerando a métrica crítica de taxa de entrega de pacotes. Em síntese, este artigo apresenta uma técnica para a gestão de recursos de rádio em dispositivos IoTs LoRa, oferecendo um caminho promissor para a melhoria da eficiência energética e a extensão da vida útil da bateria em dispositivos IoTs.

Para prosseguir com o desenvolvimento deste trabalho, propomos as seguintes etapas:

- Atribuição de valores de Qualidade de Serviço (QoS) diferenciados a grupos distintos de nós, visando enriquecer a seleção de configurações SF e TP.
- Comparar com outras propostas na literatura.
- Utilizar técnica de otimização metaheurística para fins de comparação com a solução e desempenho apresentados neste trabalho.

## Referências

- Babaki, J., Rasti, M., and Aslani, R. (2020). Dynamic spreading factor and power allocation of lora networks for dense iot deployments. In *2020 IEEE 31st Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pages 1–6.
- Bankov, D., Khorov, E., and Lyakhov, A. (2017). Mathematical model of lorawan channel access with capture effect. In *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1–5.
- Bor, M., Roedig, U., Voigt, T., and Alonso, J. (2016). Do lora low-power wide-area networks scale?
- Choi, T., Ito, M., Kanno, I., Gomez-Ponce, J., Bullard, C., Ohseki, T., Yamazaki, K., and Molisch, A. F. (2021). Energy efficiency of uplink cell-free massive mimo with transmit power control in measured propagation channel. *IEEE Open Journal of Circuits and Systems*, 2:792–804.

- Croce, D., Gucciardo, M., Mangione, S., Santaromita, G., and Tinnirello, I. (2018). Impact of lora imperfect orthogonality: Analysis of link-level performance. *IEEE Communications Letters*, 22(4):796–799.
- Croce, D., Gucciardo, M., Mangione, S., Santaromita, G., and Tinnirello, I. (2020). Lora technology demystified: From link behavior to cell-level performance. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 19(2):822–834.
- J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, A. R. T. H. e. M. P. (2015). On the coverage of lpwans: range evaluation and channel attenuation model for lora technology. *ITS Telecommunications (ITST), 14th International Conference on. IEEE*, pages 55–59.
- Jia, G., Han, G., Li, A., and Du, J. (2018). Ssl: Smart street lamp based on fog computing for smarter cities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11):4995–5004.
- Li, S., Raza, U., and Khan, A. (2018). How agile is the adaptive data rate mechanism of lorawan? In *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, pages 206–212.
- Lv, Z., Lou, R., Li, J., Singh, A. K., and Song, H. (2021). Big data analytics for 6g-enabled massive internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(7):5350–5359.
- Mahmood, A., Sisinni, E., Guntupalli, L., Rondón, R., Hassan, S. A., and Gidlund, M. (2019a). Scalability analysis of a lora network under imperfect orthogonality. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3):1425–1436.
- Mahmood, A., Sisinni, E., Guntupalli, L., Rondón, R., Hassan, S. A., and Gidlund, M. (2019b). Scalability analysis of a lora network under imperfect orthogonality. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(3):1425–1436.
- Park, G., Lee, W., and Joe, I. (2020). Network resource optimization with reinforcement learning for low power wide area networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2020.
- Premsankar, G., Ghaddar, B., Slabicki, M., and Francesco, M. D. (2020). Optimal configuration of lora networks in smart cities. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 16(12):7243–7254.
- Raza, U., Kulkarni, P., and Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 19(2):855–873.
- Reynders, B., Meert, W., and Pollin, S. (2017). Power and spreading factor control in low power wide area networks. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6.
- Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., and Gidlund, M. (2018). Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11):4724–4734.
- Slabicki, M., Premsankar, G., and Di Francesco, M. (2018). Adaptive configuration of lora networks for dense iot deployments. In *NOMS 2018 - 2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*, pages 1–9.
- Varsier, N. and Schwoerer, J. (2017). Capacity limits of lorawan technology for smart metering applications. In *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pages 1–6.