

# Maximizando a Eficiência Energética em Cidades Inteligentes: Otimização de Recursos de Rádio em Dispositivos IoTs LoRa com Programação Linear

Rayane Araújo Lima<sup>1</sup>, Marcos A. M. Seraphim<sup>1</sup>, Waldir Moreira<sup>2</sup> e Antonio Oliveira-Jr<sup>1,2</sup>

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

<sup>2</sup>Fraunhofer Portugal AICOS

{rayane\_lima, seraphim}@discente.ufg.br,

waldir.junior@fraunhofer.pt e antoniojr@ufg.br

**Abstract.** *The growing demand for energy efficiency in urban environments, especially in smart cities, becomes imperative with the massive proliferation of IoT devices on 6G networks. We highlight the critical relevance of LoRa technology for IoT applications in urban environments, highlighting the need to optimize fundamental parameters, such as Spreading Factor (SF) and Transmission Power (TP). The study compares our Linear Programming (LP) proposal with heuristic and pseudorandom methods, demonstrating that our approach stands out notably by significantly reducing energy consumption during data transmissions. These results indicate significant potential to improve both the performance and sustainability of IoT devices in 6G networks.*

**Resumo.** *A crescente demanda por eficiência energética em ambientes urbanos, especialmente em cidades inteligentes, torna-se imperativa com a proliferação massiva de dispositivos IoTs nas redes 6G. Destacamos a relevância crítica da tecnologia LoRa para aplicações IoTs em ambientes urbanos, ressaltando a necessidade de otimizar parâmetros fundamentais, como o Fator de Espalhamento (SF) e a Potência de Transmissão (TP). O estudo compara nossa proposta de Programação Linear (PL) com métodos heurísticos e pseudoaleatórios, demonstrando que nossa abordagem se destaca notavelmente ao reduzir significativamente o consumo de energia durante as transmissões dos dados. Esses resultados indicam um potencial expressivo para aprimorar tanto o desempenho quanto a sustentabilidade de dispositivos IoT em redes 6G.*

## 1. Introdução

O advento das futuras redes 6G é profundamente associado ao notável crescimento de dispositivos IoTs interconectados [Lv et al. 2021], desempenhando um papel crucial na evolução das cidades inteligentes. Desde a implementação de luzes de ruas inteligentes e sistemas de coleta de resíduos automatizados até a gestão eficiente de energia por meio de smart grids [Varsier and Schwoerer 2017, Sisinni et al. 2018, Jia et al. 2018, Mahmood et al. 2019], a proliferação dessas tecnologias redefine a maneira como as cidades são gerenciadas. Ao coletar e analisar dados provenientes desses dispositivos, as cidades ganham uma compreensão abrangente de padrões de comportamento e necessidades da comunidade, possibilitando a implementação de intervenções mais precisas e eficientes

podendo ser implementadas nas políticas públicas, nos serviços urbanos, nos programas sociais e em outras iniciativas que visam atender às necessidades da comunidade e melhorar a qualidade de vida nas cidades. Esse cenário não apenas representa uma evolução tecnológica, mas também impulsiona as cidades em direção a um futuro mais inteligente e sustentável, fundamentado em tomadas de decisões informadas por dados concretos.

Uma tecnologia de destaque nesse cenário é a 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 devido ao seu alcance, eficiência energética, capacidade de comunicação bidirecional, flexibilidade, escalabilidade e custo-efetividade, sendo ideal para uma ampla gama de aplicações IoT em diferentes setores.

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.

A otimização é crucial em ambientes urbanos devido aos desafios como colisões, interferências e perda de mensagens enfrentados por dispositivos. A seleção adequada de SF e TP, considerando a disposição física da rede e dos elementos, é fundamental para garantir o funcionamento eficiente e confiável do sistema. Este artigo aborda a importância de combinar configurações de TP e SF para maximizar a eficiência energética, considerando cenários realistas com múltiplos *gateways*, nós, interferências dos SFs e volume de dados.

Para realizar uma comparação com a técnica proposta, foram consideradas duas abordagens adicionais. A primeira delas consiste em uma heurística, chamaremos de **OPT-HEU** neste contexto, que classifica os nós com base no aumento da distância em relação ao *gateway*. Posteriormente, são atribuídos SFs a cada nó conforme uma distribuição ideal, onde os nós mais próximos recebem SFs mais baixos e os mais distantes, SFs mais altos. Com isso, a atribuição do TP segue a Tabela 5. A segunda técnica, atribui os valores de SFs e TPs de forma pseudoaleatória, chamaremos de **OPT-RANDOM**, sem considerar quaisquer características da rede.

As contribuições centrais deste artigo são elencadas a seguir:

- **Otimização de recursos em LoRa:** enfoque estratégico na eficiência energética em ambiente urbanos complexos.
- **Modelagem de cenários realistas:** Nossa proposta modela cenários mais próximos a realidade, incorporando a presença de múltiplos *gateways*, nós, interferências provenientes dos SFs e o volume dos dados entregues.
- **Aplicação da técnica de Programação Linear (PL):** abordamos a técnica de PL na alocação estratégica de recursos críticos, como SF e TP, visando maximizar a eficiência energética.

O resto do artigo está organizado a seguir. A seção 2 apresenta os trabalhos relacionados, enfatizando a novidade da nossa proposta. A otimização de recursos proposta

é discutida na Seção 3 com um novo algoritmo de otimização de recursos. A análise de performance, resultados e discussão estão na Seção 4. Por fim, a Seção 5 apresenta a conclusão e perspectiva para trabalhos futuros.

## 2. Trabalhos Relacionados

Pesquisas recentes evidenciaram, por meio de experimentos práticos e simulações computacionais, os impactos significativos das interferências entre SFs [Croce et al. 2017, Zhu et al. 2018, Mahmood et al. 2019]. Em [Mahmood et al. 2019] também destacou uma redução significativa no desempenho ao considerar interferências entre SFs em implantações de alta densidade, porém o cenário foi avaliado utilizando apenas um *gateway*, e a eficiência energética da rede não foi analisada para demonstrar como as interferências dos SFs afetam o desempenho global do sistema.

O estudo em [Croce et al. 2020] utiliza a taxa geral de entrega de pacotes e o SF específico em modelos analíticos, porém não avalia o custo energético da rede. Pesquisas em redes LoRa com simulações mostraram que uma alta taxa de entrega para um SF específico não garante o mesmo desempenho para todos os dispositivos que utilizam esse mesmo SF [Preamsankar et al. 2020], mas não abordam como as interferências dos SFs podem afetar o desempenho da rede. Fatores como interferência, distância até o *gateway* e colisões de pacotes podem influenciar essa variação, destacando a importância de considerar não apenas a taxa geral de entrega, mas também a experiência individual de cada dispositivo ao alocar um SF específico.

Em [Park et al. 2020], os autores propõem um método baseado em aprendizado por reforço profundo para otimizar a distribuição de recursos de rede, como SF, TP e canal, visando minimizar o consumo de TP em relação à taxa de dados. No entanto, o cenário avaliado não abrange cenários massivos de dispositivos nem considera a interferência de SFs. Em contrapartida, [Babaki et al. 2020] e [Li et al. 2018] adaptam o algoritmo ADR convencional para maximizar a eficiência energética e a taxa de pacotes entregues, com alocação dinâmica de SF e TP para cada nó, mas também consideram apenas um *gateway* na rede e não abordam a interferência de SFs. Por sua vez, [Preamsankar et al. 2020] modela múltiplos *gateways*, aproximando-se de redes realísticas, embora não analise os SFs nos nós. Além disso, [Varsier and Schwoerer 2017] destaca o aumento na perda de pacotes em redes LoRa conforme o número de dispositivos aumenta, destacando a necessidade de considerar esses fatores em implantações massivas de dispositivos IoT.

A Tabela 1, demonstra de forma resumida o diferencial deste estudo em relação aos trabalhos relacionados. Propomos um novo algoritmo de otimização utilizando programação linear (OPT-PL) para a alocação estratégica de SFs e TPs em redes LoRa. O algoritmo aborda elementos críticos da rede, como interferência entre SFs, distância até o *gateway* e volume de dados entregues. Desenvolvida para lidar com cenários massivos de dispositivos e múltiplos *gateways*, a proposta busca aprimorar significativamente a eficiência energéticas das redes LoRa.

## 3. Alocação dos Parâmetros de Transmissão LoRa

### 3.1. Tecnologia LoRa

Uma rede LoRa consiste em nós alimentados por baterias que se comunicam com *gateway* utilizando a tecnologia de modulação de espectro espalhado conhecida como "chirp". Os

<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>Interferência SFs</b>	<b>Mais de 3 Gateways</b>	<b>Mais de 1000 nós</b>	<b>Minimizar consumo de energia</b>
[Waret et al. 2019]	x		x	x
[Babaki et al. 2020]				x
[Park et al. 2020]				x
[Mahmood et al. 2019]	x		x	
[Croce et al. 2020]	x	x	x	
[Varsier and Schwoerer 2017]			x	
[Premsankar et al. 2020]		x	x	x
[Li et al. 2018]			x	x
[Croce et al. 2017]	x			
[Zhu et al. 2018]	x			
<b>Nossa Proposta</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	<b>x</b>

**Tabela 1. Comparação deste trabalho com trabalhos relacionados.**

nós transmitem pacotes para os *gateways* por meio de um protocolo MAC baseado em ALOHA. Notavelmente, as mensagens enviadas pelos nós são recebidas por todos os *gateways* que estão dentro do alcance de comunicação [Raza et al. 2017]. Isso implica que, em uma rede LoRa, os nós não são exclusivamente associados a um único *gateway*.

Após os *gateways* encaminharem 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, é importante destacar que a tecnologia LoRa oferece comunicação de longa distância com baixo consumo de energia. Nesse contexto, a escolha dos SFs e TPs desempenham um papel fundamental, pois influencia diretamente a taxa de dados, o alcance dos dispositivos na rede e o consumo de energia, como mencionado em [Slabicki et al. 2018].

Por exemplo, ao optar por um SF elevado e um TP alto, é possível alcançar uma maior distância de transmissão, porém com um consumo de energia maior e uma taxa de dados reduzida. Em contrapartida, a escolha de um SF baixo e um TP reduzido pode resultar em uma taxa de dados mais alta, mas com um alcance limitado e um consumo de energia menor, conforme discutido em [Adelantado et al. 2017]. Esses aspectos ressaltam

a importância de considerar cuidadosamente as configurações de SFs e TPs para otimizar o desempenho e a eficiência energética em redes LoRa.

### 3.2. Modelo do Sistema

A rede a ser configurada consiste em *gateways*  $k \in \mathcal{K}$  LoRa e nós  $n \in \mathcal{N}$ . Nos estudos realizados, os nós são estáticos, o que impede a alteração de suas localizações para alcançar um melhor desempenho. Diante disso, a otimização de recursos se destaca como a melhor alternativa para aprimorar o 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 comunicar com um *gateway*. Por simplicidade, considera-se que a perda de propagação ( $PL_{nk}$ ) é assumida [Rappaport 2002]:

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

Assim, a potência recebida ( $P_{n,k}^r$ ) no nó  $n$  no *gateway*  $k$ :

$$P_{n,k}^r = P_n^t - \overline{PL}(d_0) - 10\eta \log\left(\frac{d_{nk}}{d_0}\right) - X_\sigma \quad (2)$$

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* ( $k$ ),  $\overline{PL}(d_0)$  é a perda de propagação média na distância de referência  $d_0$ ,  $\eta$  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 e  $P_n^t$  é a potência de transmissão (TP).

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:

$$R_b = \frac{B \times s}{2^s} \quad (3)$$

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. 2019], [Croce et al. 2018]. O limite para diferente pares de SFs é definido na matriz:

$$SIR = \begin{bmatrix} 1 & -8 & -9 & -9 & -9 & -9 \\ -11 & 1 & -11 & -12 & -13 & -13 \\ -15 & -13 & 1 & -13 & -14 & -15 \\ -19 & -18 & -17 & 1 & -17 & -18 \\ -22 & -22 & -21 & -20 & 1 & -20 \\ -25 & -25 & -25 & -24 & -23 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para realizar uma análise de interferência, são designados SFs a dois nós específicos: um deles é denominado nó de teste  $n$ , e o outro é o nó interferente  $j$ . As linhas da matriz representam os SFs do nó de teste  $n$ , enquanto as colunas representam os SFs de  $n$ . Os índices de SF aumentam ao longo das linhas/colunas, por exemplo, de SF7 até SF12. O conjunto de interferência  $\mathcal{J}_n$  para o nó  $n$  utilizando o SF  $s$  pode ser obtido:

$$\mathcal{J}_n = \{j | P_n^r - P_j^r < SIR_{n_s, j_s}\} \quad (5)$$

A matriz  $SIR_{n_s, j_s}$  representa o limite para o nó de teste  $n$  ao utilizar o SF  $s$ , enquanto o nó potencialmente interferente  $j$  utiliza o SF  $s'$ . Através deste conceito, podemos exemplificar a situação em que o nó de teste  $n$  utiliza SF8 e um possível nó interferente  $j$  utiliza SF12. Se a diferença de potência recebida pelo *gateway* ( $P_n^r - P_j^r$ ) é menor que -13 dB (Equação (4)), então podemos concluir que  $j$  está efetivamente causando interferência no nó  $n$ , tornando  $j$  um interferente.

A taxa de entrega de um nó pode ser avaliada 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]:

$$D_n = e^{-2\lambda T_s |N_s|} \quad (6)$$

### 3.3. Descrição do Problema

O cenário utilizado para a formulação do problema (Figura 1) é composto por quatro nós ( $N = 4$ ), dois *gateways* ( $K = 2$ ) e seis SFs disponíveis ( $S = 6$ ). 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, o nó dentro da região SF7 pode usar qualquer SF dentro do conjunto  $\{7, 8, 9, 10, 11, 12\}$ , enquanto que na região SF8 pode-se 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 ener-

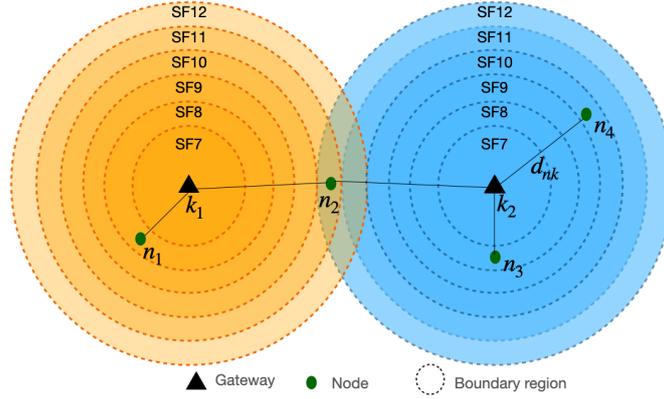


Figura 1. Cenário considerado para a formulação do problema.

gia. Portanto, é fundamental encontrar um equilíbrio entre o SF e o TP para otimizar o consumo de energia na rede.

### 3.4. Formulação do Problema

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 de SFs, qualidade do canal e posição dos nós 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.

Na Tabela 2, apresentamos um resumo das notações utilizadas. Quanto à configuração do sistema, adotaremos as medidas de alcance médio por *gateway* (Tabela 3) e os valores dos parâmetros de simulação (Tabela 4), ambos considerando um cenário urbano. Ressaltamos que o alcance médio indicado na Tabela 3 é uma estimativa que pode variar de acordo com as 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
$\mathcal{J}_n$	Conjunto de nós de teste
$N$	Conjunto de nós
$P_{n,k}^r$	Potência recebida do nó $n$ no <i>gateway</i> $k$
$PL_{nk}$	Perda de propagação entre um nó $n$ e <i>gateway</i> $k$
$\overline{PL}(d_o)$	Perda de propagação média para a distância $d_o$
$d_o$	Distância mínima de um certo <i>gateway</i>

Tabela 2. Sumário de Notações Utilizadas

Nosso objetivo é otimizar por meio de programação linear, chamaremos de **OPT-PL**, a atribuição de SF e TP para cada nó da rede, tal que o consumo de energia seja

Alcance médio (m)	Possíveis SFs
1 - 181	7, 8, 9, 10, 11, 12
182 - 362	8, 9, 10, 11, 12
363 - 543	9, 10, 11, 12
544 - 724	10, 11, 12
725 - 905	11, 12
906 - 1010	12

**Tabela 3. Alcance médio por gateway com base no SF e TP.**

Parâmetros	Valores
Fatores de Espalhamento ( $\mathcal{S}$ )	{ 7, 8, 9, 10, 11, 12 }
Potência de Transmissão ( $\mathcal{P}$ )	{ 2, 5, 8, 11, 14 } dBm
Potência recebida ( $P_n^r$ )	Eq. (2) com $\overline{PL}(d_0) = 127.41$ , $d_0 = 40$ , $\eta = 2.08$ , $\sigma = \{0, 3.57\}$
Frequência da operadora	868 MHz
Largura de banda	125kHz
Taxa de codificação	4/8
Tamanho da mensagem	20 bytes

**Tabela 4. Parâmetros de Simulação para cenário urbano [J. Petajajarvi 2015].**

reduzida (função objetivo: Equação 7a). O objetivo é minimizar o TP  $p$  do sistema, levando em consideração as características dos dispositivos, SFs disponíveis, distância entre dispositivos e gateways e interferência de SF.

Para tal, 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. 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 3. Para manter um nível adequado de desempenho de comunicação a restrição na Equação (7c) trás uma adaptação da Equação (3), 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 terceira restrição é mostrada na Equação (7d) onde os SFs a ser atribuídos não pode causar interferência ao nó vizinho. Finalmente, as Equações (7e) e (7f) certificam que o nó está conectado a um único gateway e possui um único SF atribuído, respectivamente.

$$\min \sum_{n \in N} \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times p \quad (7a)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{n,k} \times d \leq \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times d_{n,s,max}, \quad \forall n, s \in N, \mathcal{S} \quad (7b)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times (2^s) \times Q \leq \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times s \times B, \quad \forall n \in N \quad (7c)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} y_{n,s} \times P_n^r - \sum_{s \in \mathcal{S}} y_{j,s} \times P_j^r \leq SIR_{n_s, j_s} \quad \forall n, j \in N \quad (7d)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} x_n^k = 1, \quad \forall n \in N \quad (7e)$$

$$\sum_{s \in \mathcal{S}} y_n^s = 1, \quad \forall n \in N \quad (7f)$$

Para a atribuição do TP foi considerado uma relação inversamente proporcional ao SF, conforme Tabela 5. O algoritmo de otimização delineado encontra-se detalhado no Algoritmo 1.

**Tabela 5. Potência de Transmissão - TP [Bor et al. 2016].**

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

---

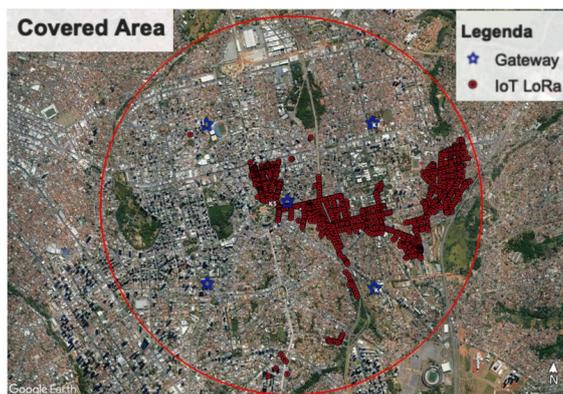
**Algorithm 1** OPT-PL

---

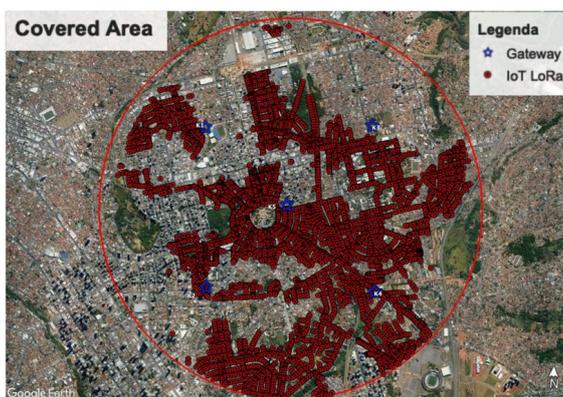
- 1: **Entrada:** Lista de Nós,  $n \in N$
  - 2:  $\phi$  = Fator de controle de quantidade de bits,  $0 \leq \phi \leq 1$
  - 3: B = 125 kHz (Largura de Banda)
  - 4: **Saída:** SF e TP
  - 5: **for**  $n \in N$  **do**
  - 6:    $\sum_{k \in \mathcal{K}} x_{n,k} = 1$
  - 7:    $\sum_{s \in \mathcal{S}}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

#### 4. Resultados e discussão

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 análise do sistema, foi considerado o cenário urbano com 1000 nós e com 5000 nós (Figura 2). A localização dos nós foi determinada utilizando o banco de dados da ANEEL [ANEEL 2023]. Foram posicionados 5 *gateways* manualmente de forma que suas respectivas áreas de cobertura pudessem cobrir o maior número de nós possíveis.



(a) 1000 Nós IoTs.



(b) 5000 Nós IoTs.

**Figura 2. Área de cobertura considerada em Goiânia - GO.**

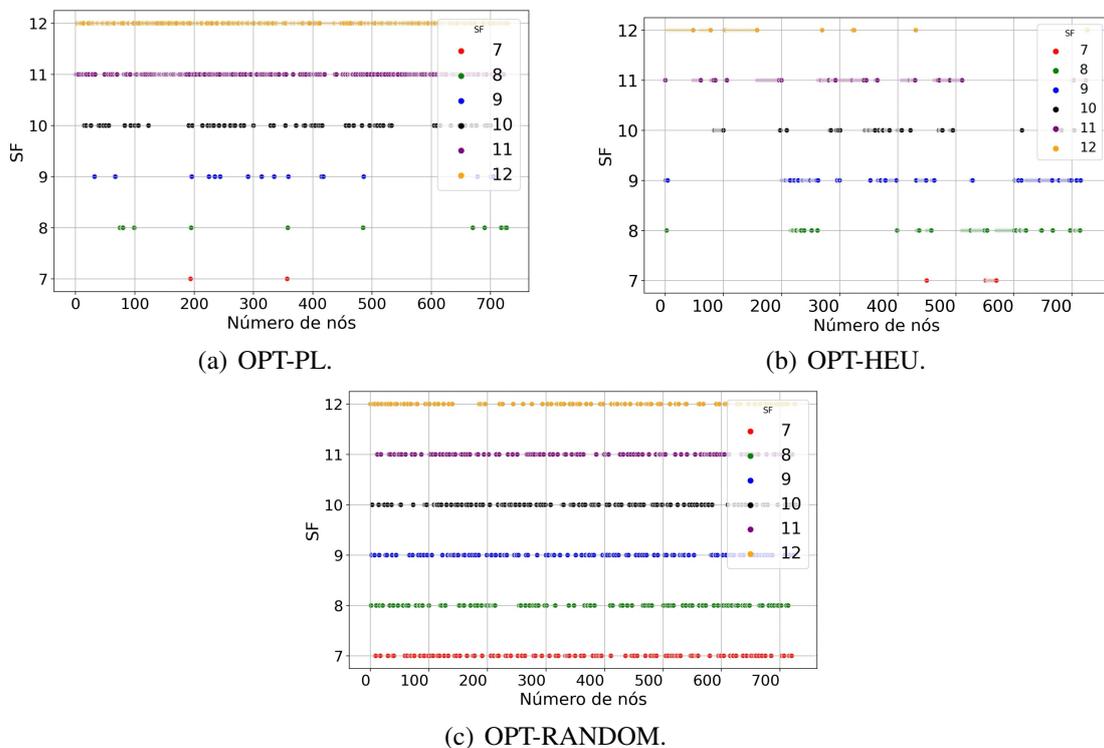
Após a implementação dos *gateways*, alguns nós se encontravam fora da área de cobertura. Esses nós foram removidos do banco de dados, visando a análise exclusiva da performance daqueles que permaneciam dentro da área de cobertura.

Com base nas configurações obtidas, a rede foi avaliada por meio de simulações utilizando o *framework* FLoRa [Slabicki et al. 2018], uma ferramenta de código aberto construída sobre o OMNET++. Os parâmetros adicionais empregados na simulação da rede estão detalhados na Tabela 4. Em todos os cenários, os resultados das simulações são obtidos com 30 execuções. Para avaliar a performance do nosso algoritmo foi analisado o seguinte critério: **Consumo de energia (mJ)**: definido pelo consumo de energia total de todos os nós dividido pelo número de nós.

A análise inicial na rede consiste em verificar se todos os nós possuem cobertura.

No primeiro cenário, de um total de 1000 nós, apenas 728 estavam na área de cobertura, enquanto no segundo cenário, com 5000 nós, apenas 4150 estavam dentro da área de cobertura. Os nós sem cobertura foram excluídos do banco de dados, focalizando a análise nos que realmente tinham alcance de comunicação.

A configuração resultante da nossa proposta atribuiu para a maioria dos nós valores de SF mais elevados (Figuras 3(a) e 4(a)), resultando em TPs correspondentes mais baixas. Quando considerado somente o fator "distância", como no algoritmo OPT-HEU (Figuras 3(b) e 4(b)), a alocação não considera outros quesitos de rede, como minimizar o consumo de energia. No entanto, na nossa proposta, a alocação é restrita não apenas pela proximidade física, mas também considera critérios adicionais, como a taxa permitida de perda de pacotes ( $\phi = 20\%$ , ou seja, considerando que somente 80% dos pacotes são entregues com sucesso) e interferências causadas pelos nós vizinhos. A técnica OPT-RANDOM (Figuras 3(c) e 4(c)) atribui valores tanto de SF quanto de TP de maneira pseudoaleatória.



**Figura 3. Alocação de SFs para 728 nós.**

A Figura 5(a) exibe o consumo de energia dos nós. Ao considerar 728 nós (Figura 5(a)), observamos que tanto as abordagens OPT-RANDOM quanto OPT-HEU demonstraram uma tendência linear no consumo, com variações mínimas independentemente da quantidade de nós. No entanto, nossa proposta exibiu um consumo inicial significativo nos 200 primeiros nós, seguido por uma queda acentuada, com posterior estabilização e um leve aumento. Apesar da curva irregular, nosso modelo ainda registrou um consumo total de energia inferior quando comparado com as outras técnicas.

No contexto de um cenário massivo de nós (Figura 5(b)), o consumo de energia das demais técnicas exibiram curvas sutis, porém acentuadas. Notavelmente, a abordagem

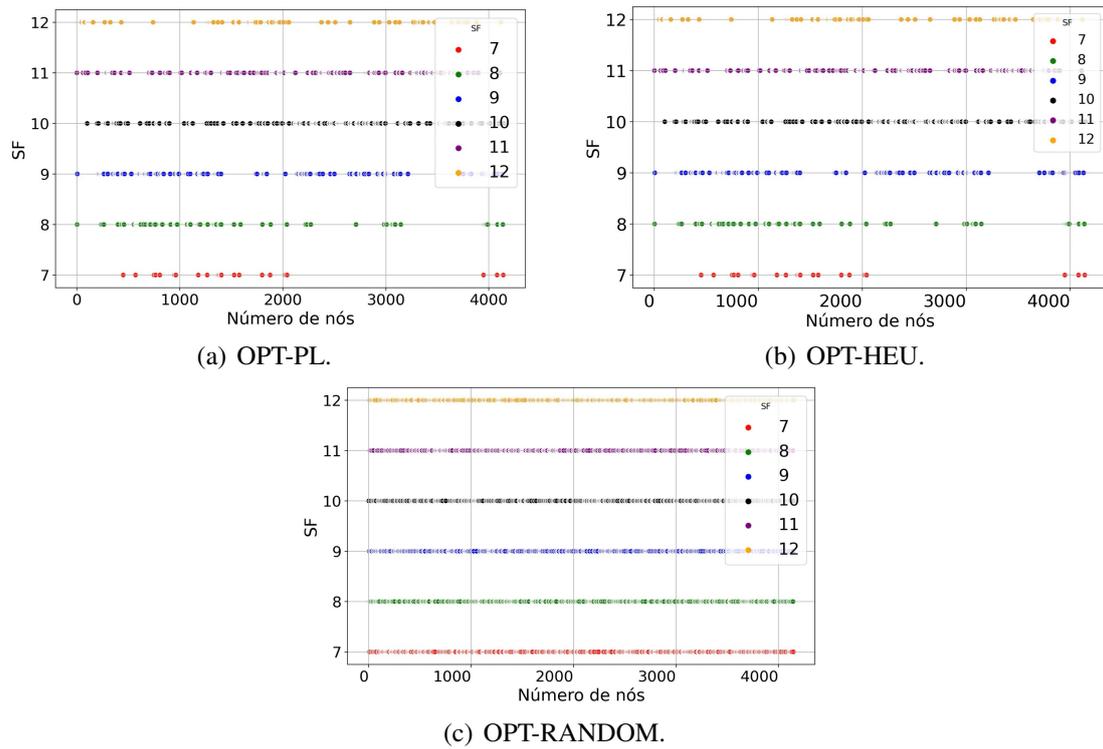


Figura 4. Alocação de SFs para 4150 nós.

OPT-RANDOM registrou um consumo mais elevado de energia em ambos os cenários. Esta técnica, que não leva em consideração nenhuma característica específica da rede, demonstrou ser mais onerosa em termos de consumo energético. A técnica OPT-HEU trouxe o segundo menor consumo de energia, além de considerar a distância do nó ao *gateway*, considerou também no conjunto de *gateways* disponíveis o *gateway* mais próximo. Em contrapartida, nossa proposta, a técnica OPT-PL, apresentou um menor consumo de energia quando comparada com as demais técnicas, em ambos os cenários investigados. Vale ressaltar que a desvantagem da nossa técnica reside no tempo computacional necessário para configurar os parâmetros, uma vez que considera diversas características (restrições) da rede. Ainda assim nossa proposta é mais eficiente comparado com as outras.

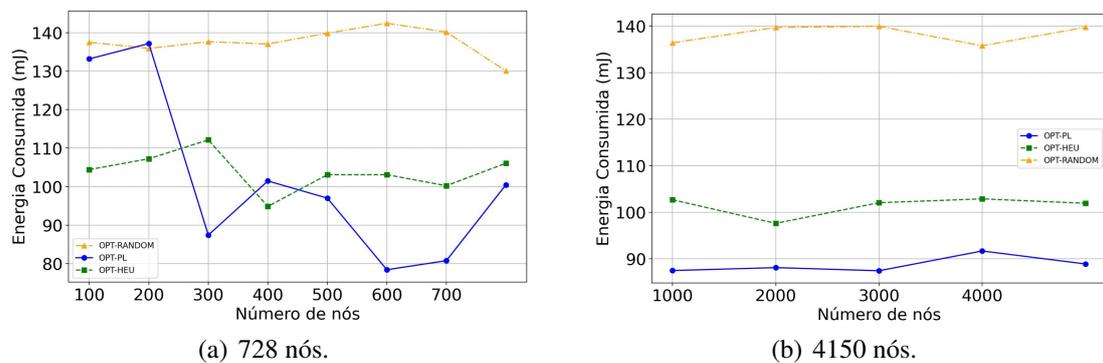


Figura 5. Energia consumida (mJ).

## 5. Conclusão e Trabalhos Futuros

O nosso estudo destaca o potencial significativo das técnicas de programação linear na otimização dos recursos de rádio em dispositivos IoTs LoRa, concentrando-se especificamente na eficiência energética no contexto das redes 6G em cidades inteligentes. Ao abordarmos cenários realistas e considerarmos características práticas, como a presença de múltiplos *gateways* e a interferência entre os SFs, conseguimos realizar uma alocação estratégica de recursos críticos, como o SF e TP, com o objetivo de maximizar a eficiência energética. A nossa proposta evidenciou um menor consumo de energia em comparação com outras técnicas existentes. As descobertas obtidas sugerem que essa proposta possui um potencial considerável para aprimorar o desempenho e a sustentabilidade das redes IoTs. Como perspectivas futuras, planejamos incorporar técnicas de metaheurísticas para escalonar a quantidade de nós na rede, trazendo em parametrizações dinâmicas, considerando mais características da rede.

## 6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## Referências

- Adelantado, F., Vilajosana, X., Tuset-Peiro, P., Martinez, B., Melia-Segui, J., and Watteyne, T. (2017). Understanding the limits of lorawan. *IEEE Communications Magazine*, 55(9):34–40.
- ANEEL (2023). Base de dados - nacional brasil.
- 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.
- Bor, M., Roedig, U., Voigt, T., and Alonso, J. (2016). Do lora low-power wide-area networks scale?
- 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.
- Croce, D., Gucciardo, M., Tinnirello, I., Garlisi, D., and Mangione, S. (2017). Impact of spreading factor imperfect orthogonality in lora communications. In *Towards a Smart and Secure Future Internet*, volume 766, pages 6510–6523, Cham, Switzerland. Springer.
- 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 Trans. Ind. Informat.*, 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. (2019). Scalability analysis of a lora network under imperfect orthogonality. *IEEE Trans. Ind. Informat.*, 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.
- Rappaport, T. S. (2002). Wireless communications – principles and practice, second edition. (the book end). *Microwave Journal*, 45(12):128. Gale Academic One-File, [link.gale.com/apps/doc/A97115718/AONE?u=googlescholar&sid=bookmark-AONE&xid=b90e8934](http://link.gale.com/apps/doc/A97115718/AONE?u=googlescholar&sid=bookmark-AONE&xid=b90e8934).
- 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 Trans. Ind. Informat.*, 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 *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pages 1–6.
- Waret, A., Kaneko, M., Guitton, A., and El Rachkidy, N. (2019). Lora throughput analysis with imperfect spreading factor orthogonality. *IEEE Wireless Communications Letters*, 8(2):408–411.
- Zhu, G., Liao, C.-H., Suzuki, M., Narusue, Y., and Morikawa, H. (2018). Evaluation of lora receiver performance under co-technology interference. In *Proc. 15th IEEE Annu. Consum. Commun. Netw. Conf. (CCNC)*.