

Modelo de Otimização de Alocação de Recursos em LoRaWAN para Aplicações de Internet das Coisas

Nagib Matni¹, Jean Moraes¹, André Riker¹, Helder Oliveira¹,
Denis Rosário¹ e Eduardo Cerqueira¹

¹Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém – Pará – Brasil

nagib@ufpa.br, jean.anjos.moraes@itec.ufpa.br

{afr, heldermay, denis, cerqueira}@ufpa.br

Abstract. *LoRaWAN is the most widely used long-range wireless IoT application that works with high density, as LoRaWAN connects devices that require low-cost, long-range communication services. However, LoRaWAN densification poses a number of challenges due to simultaneous transmission interference on the same channel or higher power consumption by the device. In this context, it is crucial to understand LoRaWAN's resource allocation mechanisms to optimize the configuration of radio specific parameters, i.e., Spreading Factor (SF) and Carrier Frequency (CF), where the optimization of transmission parameters via models Optimization is an open challenge. This paper presents MARCO, a resource allocation optimization model for minimizing LoRaWAN QoS for IoT applications. The MARCO model considers mixed integer linear programming to define optimal SF and CF parameter settings, as well as overall network traffic specifications. Simulation results demonstrate the efficiency in terms of data extraction rate, number of collisions and energy compared to existing LoRaWAN resource allocation models.*

Resumo. *O LoRaWAN é a tecnologia sem fio de longo alcance mais utilizada para aplicações de Internet das Coisas (IoT) que trabalham com alta densidade, pois é capaz de conectar dispositivos que requerem serviços de comunicação de longo alcance, baixo custo e menor consumo de energia. Contudo, a densificação do uso de LoRaWAN em serviços IoT traz uma série de desafios devido a interferência por transmissão simultânea no mesmo canal e/ou maior consumo de energia pelos dispositivos. Nesse contexto, é crucial entender os conceitos de alocação de recursos do LoRaWAN para otimizar a configuração de parâmetros específicos do rádio, i.e., Fator de Espalhamento (SF) e Frequência de portadora (CF), em que a otimização dos parâmetros de transmissão via modelos de otimização é um desafio em aberto. Este artigo apresenta o MARCO, um modelo de otimização de alocação de recursos para minimizar a Qualidade de Serviço (QoS) do LoRaWAN para aplicações de IoT, além de contribuir para a melhora da eficiência energética dos dispositivos. O MARCO considera uma programação linear inteira mista para definir as configurações ideais dos parâmetros SF e CF, bem como especificações de tráfego da rede como um todo. Resultados de simulação demonstram a eficiência em termos de taxa de extração de dados, número de colisões e consumo de energia do MARCO em comparação com as heurísticas de alocação de recursos para LoRaWAN existentes.*

1. Introdução

Estimativas apontam que 500 bilhões de dispositivos Internet das Coisas (IoT, de *Internet of Things*) estarão conectados à Internet até 2030 [Yastrebova et al. 2018]. A recente explosão de tecnologias de IoT tem mudado significativamente o comportamento da sociedade, gerando uma grande variedade de novas aplicações e, conseqüentemente, uma heterogeneidade nos requisitos de comunicação dos dispositivos [Akpakwu et al. 2018]. Desta forma, as redes IoT densas surgem com novos requisitos desafiadores em termos de baixo consumo de energia, alta cobertura, Qualidade de Serviço (QoS) e *massive Machine-Type Communication* (mMTC) [Bockelmann et al. 2016].

Nesse contexto, as tecnologias de transmissão inovadoras de longo alcance, como o *Long Range Wide Area Network* (LoRaWAN), mostram-se promissoras em ambientes urbanos e rurais de área ampla por operar em faixas de frequência não licenciadas e de fácil implementação, baixo consumo de energia e taxa de transferência adaptada ao contexto de IoT [Raza et al. 2017]. Em LoRaWAN existirá potencialmente um alto número de dispositivos IoT enviando dados para o servidor de aplicativos através do mesmo *Gateway*. Contudo, a densificação do LoRaWAN afeta a QoS devido a perda de pacotes causadas por colisões e interferências de transmissões simultâneas. Por exemplo, o *gateway* será incapaz de decodificar corretamente sinais simultâneos enviados por dispositivos usando o mesmo fator de espalhamento (SF, de *Spreading Factor*) no mesmo canal.

Um dos principais benefícios do LoRaWAN é a flexibilidade em termos de parâmetros de rádio que são ajustáveis em tempo real para reduzir a interferência na comunicação, o qual é feito por meio de um mecanismo de alocação de recursos [Caillouet et al. 2019]. Nesse contexto, o LoRaWAN suporta diferentes valores de SF, bem como diferentes frequência de portadora (CF, de *Carrier Frequency*) para fornecer um *tradeoff* entre a taxa de transmissão, atraso, energia, interferência e alcance [Raza et al. 2017]. Por exemplo, SFs menores fornecem taxas de dados mais altas ao custo de alcance reduzido, baixo tempo de transmissão e consumo de energia, enquanto SFs maiores são o oposto. Além do mais, os SFs são projetados para serem ortogonais, permitindo que os sinais sejam facilmente separados no receptor e, conseqüentemente, evitando colisões. Apesar do LoRaWAN oferecer diferentes possibilidades para ortogonalizar as transmissões, a alocação eficiente de recursos para transmissões em LoRaWAN é uma tarefa desafiadora, tendo em vista que a densificação do LoRaWAN aumenta a probabilidade dos dispositivos terem o mesmo SF para um mesmo canal, ocasionando uma maior probabilidade de colisões durante as transmissões.

O mecanismo de alocação de recursos do LoRaWAN tem diversas possibilidades de configurações de parâmetros específicos relacionados ao rádio [Bor and Roedig 2017]. Além disso, a rede LoRaWAN possui muitas variáveis que impactam diretamente no desempenho da rede, onde são definidas como lineares, porém nem todas são caracterizadas como inteiras. Assim, Programação Linear Inteira Mista (PLIM) é um método para resolver problemas de otimização com restrições. Desta forma, um modelo matemático desenvolvido através de PLIM é de grande importância para formular e apresentar resultados da solução ótima para maximizar o desempenho, pois é possível obter uma melhor configuração dos parâmetros em dispositivos IoT com baixo poder computacional. No estado-da-arte, alguns trabalhos focaram na alocação de recurso do LoRaWAN através de modelos de otimização usando alocação de

SF [El-Aasser et al. 2018, Caillouet et al. 2019, Amichi et al. 2019], alocação de SF juntamente à Taxa de codificação (CR, de *Code Rate*) [Sandoval et al. 2019a] e maximizar a vazão [Sandoval et al. 2019b]. Contudo, definir um modelo de otimização dos parâmetros de CF e SF que maximize a entrega de dados ainda é um desafio em aberto [Ertürk et al. 2019].

Este artigo apresenta o Modelo de otimização para Alocação de Recursos em LoRaWAN para aplicações de internet das COisas (MARCO). O modelo considera uma PLIM para definir as configurações ideais dos parâmetros de rádio SF e CF. Com isso, o MARCO maximiza a utilização do canal, enquanto realiza um *tradeoff* entre melhorar QoS e reduzir colisões. Resultados de simulação demonstram que o MARCO provê um ganho na taxa de Extração de dados (DER, de *Data Extraction Rate*) e tempo no ar (ToA, de *Time on Air*) de um pacote, devido o MARCO reduzir em pelo menos 2 vezes a quantidade de colisão de pacotes comparado a modelos de alocação de recurso existentes. Além do mais, o MARCO demonstra um consumo de energia 3 vezes menor quando comparado a modelos do estado-da-arte.

O presente artigo está organizado conforme descrito a seguir. A Seção 2 apresenta uma visão geral sobre trabalhos que exploram alocação de recursos em LoRaWAN. A Seção 3 introduz o modelo de sistema e detalhes do MARCO para definir as configurações ideais dos parâmetros SF e CF. A Seção 4 explora o modelo de simulação desenvolvido para avaliar o modelo MARCO, bem como os resultados obtidos. Por fim, a Seção 5 conclui o artigo com considerações finais e direções para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Dawaliby *et al.* desenvolveram uma solução baseada em Redes Definidas por Software em conjunto com o fatiamento de rede para otimização e gerência em larga escala do LoRaWAN [Dawaliby et al. 2019]. Para essa otimização, múltiplas fatias virtuais são construídas em cima de um *gateway* LoRaWAN, na qual cada fatia da rede possui pesos para indicar sua importância ou urgência, confiabilidade e energia. Os autores buscam encontrar a estratégia ótima de fatiamento com as configurações corretas de SF e potência de transmissão que simultaneamente maximizam os indicadores de QoS no fatiamento e também minimiza o consumo de energia enquanto aumenta a confiabilidade. Contudo, esse trabalho adiciona uma sobrecarga de processamento para realizar o fatiamento do LoRaWAN o que reduz a disponibilidade de recursos de rede, bem como não considera o CF (*i.e.*, canais) na tomada de decisão. Além de não analisar o custo computacional para a aplicação da solução proposta, esse trabalho também não analisa métricas de avaliação importante para aplicações IoT, tal como atraso, DER e colisões.

Amichi *et al.* formulam uma otimização não linear de inteiros mistos considerando os efeitos nocivos das interferências entre SFs [Amichi et al. 2019]. Este trabalho está focado em obter uma taxa de transferência justa e reduzir o consumo de energia. Um dos pontos positivos desse trabalho é que ao invés de assumir a ortogonalidade perfeita do SF, os autores fazem uma formulação em conjunto do SF e a alocação de potência para maximizar a taxa de transferência mínima de ligação *upload* dos dispositivos finais. Como a ortogonalidade não é perfeita, os dispositivos estão sujeitos a interferências co-SF e inter-SF, além das restrições de energia. Porém, este modelo não considera a otimização das escolhas dos CFs, bem como redução de energia de acordo com a escolha dos SFs.

El-Aasser *et al.* apresentam duas heurísticas para alocação de SF, as quais ajustam o raio de serviço do SF, que é definido como a distância máxima na qual um SF pode ser atribuído a um dispositivo final e ainda garante a desmodulação correta pelo receptor [El-Aasser et al. 2018]. No entanto, não é recomendado definir o SF pela distância, pois este depende da potência do sinal recebido pelo dispositivo. Caillouet *et al.* apresentam um modelo ideal para LoRaWAN quando todos os dispositivos tiverem o mesmo processo de geração de tráfego [Caillouet et al. 2019]. Todavia, o modelo proposto não leva em consideração o canal, bem como a escolha de SF que reduza o consumo de energia.

Sandoval *et al.* apresentam duas cadeias de Markov para modelar o Ciclo de Transmissão (CT) e o consumo de energia [Sandoval et al. 2019b]. Com esses modelos, a solução ideal é encontrar o CT que maximize a taxa de transferência, mantendo o consumo de energia abaixo de um limite. Os autores também apresentam uma solução para calcular uma configuração de rede global que maximize a taxa de transferência obtida analiticamente [Sandoval et al. 2019a]. Todavia, nenhum dos artigos apresenta um modelo de otimização para os parâmetros de CF e SF, assim como não demonstram como as soluções afetam as colisões de pacotes e o consumo de energia.

Com base na análise dos trabalhos relacionados é possível concluir que uma mecanismo de alocação de recursos eficiente deve considerar a potência recebida no *gateway* e a distância para ajustar os parâmetros de rádio no LoRaWAN. Contudo, falta na literatura um modelo de otimização que maximize a utilização do canal e reduza a colisão de pacotes cientes da força do sinal recebida em função do posicionamento do dispositivo. A Tabela 1 apresenta uma comparação entre os trabalhos relevantes propostos para otimização da alocação de recursos em LoRaWAN.

Tabela 1. Trabalhos Relacionados

Trabalho	Objetivo da Otimização	Modelo de Otimização	Parâmetros LoRa Considerados		
			SF	CF	Energia
[Dawaliby et al. 2019]	max QoS	Fatiamento	✓	x	✓
[Sandoval et al. 2019a]	max Taxa Transf.	Alocação SF/CF	✓	x	✓
[Amichi et al. 2019]	max Taxa Transf.	Alocação SF	✓	x	✓
[El-Aasser et al. 2018]	max Taxa Transf.	Alocação SF	✓	x	x
[Caillouet et al. 2019]	max número dispositivos	Alocação SF	✓	x	x
[Sandoval et al. 2019b]	max Taxa Transf.	Alocação SF/CF	✓	x	✓

3. MARCO

Esta seção apresenta o MARCO que considera uma PLIM para definir as configurações ideais dos parâmetros SF e CF baseado na força do sinal e na distância do dispositivo IoT e o *gateway*. Primeiro, será apresentada uma visão geral do modelo de sistema utilizado. Em seguida, será descrito o modelo de alocação de recursos do LoRaWAN proposto.

3.1. Modelo de Sistema

Para fins de modelagem do LoRaWAN, assume-se que existem dois tipos de equipamentos LoRaWAN: um conjunto de dispositivos IoT e outro de *gateways* (GW). Os dispositivos IoT são implantados para coletar condições do ambiente, e enviar esses dados para um servidor de de aplicações LoRaWAN via GW para que seja realizado o tratamento

dessas informações. Para atingir um melhor desempenho, os GWs devem ser implantados no cenário com base em um algoritmo de posicionamento. Assume-se que o GW tem um espaço de cobertura circular A de raio R_a . Neste espaço A há um número de dispositivos N , posicionados seguindo uma distribuição uniforme. Para cada dispositivo IoT há uma tupla $D_i = (x_i, y_i, z_i, tx)$ para representar suas coordenadas, em que $i \in [1, N]$ é o identificador do dispositivo e tx representa a potência de transmissão em dBm .

Por outro lado, a tupla $GW = (x, y, z)$ representa as coordenadas geográficas do GW. A frequência de transmissão é dada por f . A distância entre os dispositivos IoT e o GW é calculada através da Distância Euclidiana $dist_{D_i, GW}$, na qual se considera que um dispositivo está no raio de alcance do GW sempre que $dist_{D_i, GW} \leq R_a$. Para este trabalho, foi utilizando o modelo de propagação COST231, baseado no modelo Okumura-Hata, representado por LB_i na Eq. 1 [Harinda et al. 2019]. A constante C é o fator de correção definido com um valor de 0 dB para cidades de médio porte e áreas suburbanas, e 3 para centros metropolitanos, para este trabalho foi considerado 3 [Harinda et al. 2019]. Além do mais, $a(D_i.z, f)$ representa o ambiente de propagação calculado na Eq. 2, em que foi considerado o ambiente urbano, conforme esperado em muitas aplicações IoT.

$$LB_i = 46.3 + 33.9 \log_{10}(GW.tx) - 13.82 \log_{10}(GW.z) + C - a(D_i.z, f) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(GW.z)) \log_{10}(dist_{D_i, GW}) \quad (1)$$

$$a(D_i.z, f) \begin{cases} 8.29 \cdot (\log_{10}(1.54D_i.z))^2 - 1.1 & , if \quad 150 \leq f \leq 200 \\ 3.2 \cdot (\log_{10}(11.75D_i.z))^2 - 4.97 & , if \quad 200 < f < 1500 \end{cases} \quad (2)$$

A potência total recebida (P_{rx}) pelo GW a partir do pacote enviado por um dispositivo D_i é calculada por meio da soma da potência de transmissão do dispositivo $D_i \cdot tx$ com o ganho da antena GL , subtraindo a perda de propagação LB_i , conforme a Eq. 3.

$$P_{rx} = D_i \cdot tx + GL - LB_i \quad (3)$$

Os valores de distância euclidiana e potência recebida de cada dispositivo são armazenados em uma tupla dada por $L = (D_i.x, D_i.y, dist_{D_i, GW}, P_{rx})$. A potência recebida de dispositivos IoT por um GW P_{rx} é utilizada para decidir qual é o menor SF necessário para o dispositivo conseguir se comunicar, uma vez que um GW precisa receber um pacote com potência superior ao valor de sensibilidade. A Tabela 2 apresenta valores de sensibilidade que permitem determinar o menor SF que um dispositivo LoRaWAN pode ser configurado de banda de 125 kHz.

Tabela 2. Sensibilidade para largura de banda de 125 kHz

SF	7	8	9	10	11	12
Sensibilidade (dBm)	-125	-128	-131	-134	-136	-137

A possibilidade de configurações de parâmetros de rádio é um dos principais benefícios do LoRaWAN, pois cada transmissão de pacotes pode ser gerada sob uma largura de banda (BW, de *Bandwidth*), que indica a faixa de frequências sobre as quais a

comunicação ocorrerá. Um CF, que determina seu deslocamento em termos de hertz na frequência de transmissão, pode variar de 137 MHz até 1020 MHz em passos de 61 Hz. Um SF, o qual é definido como a razão entre a taxa de símbolos e a taxa de *chirps*, em que os valores de SF mais altos aumentam a sensibilidade e o alcance das comunicações às custas de um acréscimo do ToA dos pacotes e energia dos dispositivos. Por exemplo, para uma carga de 20 bytes, ao transmitir pacotes com valor de SF 12 em vez de 11, o ToA aumenta de 659ms para 1.318ms. Além do mais, transmissão com o SF11 consome dez vezes mais energia do que usando SF7 [Duda and Heusse 2019]. Neste trabalho assume-se que um único GW pode decodificar ao mesmo tempo sinais simultâneos em todas as configurações ortogonais de SF e BW. As configurações ótimas dos valores de SF e CF são processadas dentro do Servidor de Rede, o qual tem as informações necessárias para MARCO, e assim as configurações são enviadas para os dispositivos por mensagens de configuração do *downlink*, como pode ser observado na Figura 1.

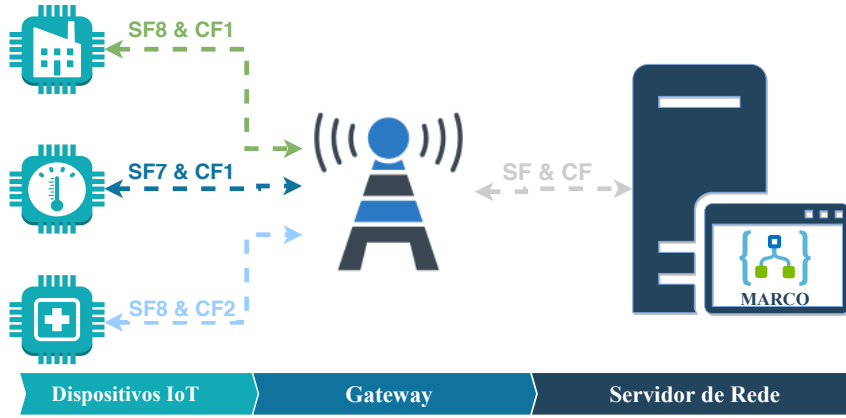


Figura 1. Arquitetura do MARCO

Um pacote LoRaWAN consiste em uma combinação de *chirps* não modulados e modulados. O não modulado formula o preâmbulo e o *Start Frame Delimiter* (SFD). Enquanto o modulado formula a carga útil e um dígito de verificação de recebimento, Checagem de redundância cíclica (CRC, de *CyclicRedundancy Check*). Desta forma, o tempo necessário para transmitir um *frame ToA* depende da duração do Preâmbulo (T_{pream}) e da duração da carga T_{carga} , conforme detalhado na Eq. 4.

$$ToA = T_{pream} + T_{carga} \quad (4)$$

A duração do preâmbulo (T_{pream}) é calculada pela soma do tamanho do preâmbulo N_{pream} com o preâmbulo obrigatório, *i.e.*, 4.25, e multiplicado pela duração do símbolo T_{simb} , conforme detalhado na Eq. 5.

$$T_{pream} = (N_{pream} + 4.25) \cdot T_{simb} \quad (5)$$

A duração do símbolo (T_{simb}) é calculada conforme Eq. 6 [Seller 2017], onde SF mais alto requer uma duração T_{simb} mais longa, considerando a BW constante.

$$T_{simb} = \frac{2^{SF}}{BW} \quad (6)$$

De forma similar a Eq. 5, a duração da carga T_{carga} considera o tamanho da carga N_{pream} multiplicado pela duração do símbolo T_{simb} , conforme apresentado na Eq. 7.

$$T_{carga} = N_{carga} \cdot T_{simb} \quad (7)$$

O tamanho do carga N_{carga} é calculado pela Eq. 8, onde PL é o tamanho do pacote, IH é o cabeçalho implícito e DE é a otimização da taxa de dados. Especificamente, IH é 0 se o cabeçalho estiver ativado, caso contrário 1. O cabeçalho implícito reduz o pacote tamanho usando configurações predefinidas de CR e CRC caso contrário, esses valores serão incluídos no cabeçalho do quadro. Se DE dados estiver ativada, o valor DE será definido como 1.

$$N_{carga} = 8 + \max(\text{ceil} \left[\frac{(8PL - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH)}{4(SF - 2DE)} \right], 0) \cdot (CR + 4), 0 \quad (8)$$

O valor de CR pode ser calculado pela Eq. 9.

$$CR = \frac{4}{4 + n}, n \in [1, 4] \quad (9)$$

O MARCO prioriza a utilização de alguns SFs específicos para proporcionar um equilíbrio entre minimização da entrega de pacotes com redução do atraso e consumo de energia. Isso deve-se ao fato que quanto maior o SF maior será o ToA, mantendo o canal ocupado por um longo período de tempo, e assim aumentando as colisões [Yousuf et al. 2018]. Vale a pena realçar que o SF7 suporta significativamente mais dispositivos com menor interferência em comparação com outros SFs, devido à relação entre a taxa de transmissão e SF [Yousuf et al. 2018]. Desta forma, a partir das Eqs. 4-9 é possível obter o ToA para cada SF, representado por um vetor de ToA $ToA_{SF} = [T_{SF7}, T_{SF8}, T_{SF9}, T_{SF10}, T_{SF11}, T_{SF12}]$. Com base nesses valores de tempo ToA_{SF} é possível definir um vetor de pesos, o qual é fundamental para o processo de otimização, pois ele definirá a quantidade máxima de dispositivos por SF. Para definição do vetor de pesos, é necessário fazer a soma dos tempos do *AirTime*.

$$TempoTotal = \sum_{sf \in SF} ToA_{sf} \quad (10)$$

A soma total $TempoTotal$ é então normalizada conforme Eq. 11, uma vez que, é necessário saber qual a proporcionalidade de cada SF para um LoRaWAN.

$$SfPonderado_{SF} = \frac{ToA_{SF}}{TempoTotal} \quad (11)$$

Posteriormente, a soma é invertida conforme Eq. 12, pois ToA maior significa um pior desempenho na rede.

$$SomaPonderada = \sum_{sf \in SF} \frac{1}{SfPonderado_{sf}} \quad (12)$$

O vetor de prioridade ou vetor de pesos é calculado a partir de uma nova normalização. Dividindo o vetor de tempo normalizado anteriormente pela soma do mesmo (Eq. 13).

$$Priori_{SF} = \frac{SfPonderado_{SF}}{SomaPonderada} \quad (13)$$

3.2. Formulação

O MARCO considera uma formulação de otimização linear inteira mista, pois considera variáveis (ToA_{sf} e $Priori_{SF}$) que não são inteiras. No presente estudo, devido à natureza dos dados empíricos aos quais o modelo foi aplicado, este trabalho lida apenas com os parâmetros CF e SF. Desta forma, o MARCO considera uma PLIM para definir as configurações ideais dos parâmetros SF e CF com o objetivo de minimizar a utilização do canal, reduzindo assim o número de colisões do LoRaWAN. No desenvolvimento do modelo, as seguintes variáveis são definidas para formular a menor utilização do canal:

- $\vartheta_{d,sf,cf} \in \{0, 1\}$: variável binária, em que 1 representa que o dispositivo d , com fator de espalhamento sf no canal cf , foi escolhido pelo modelo, 0 caso contrário;
- $\delta_{d,sf} \in \{0, 1\}$: variável binária, no qual 1 representa que o dispositivo d tem potência suficiente para o fator de espalhamento sf , 0 caso contrário;
- λ : taxa média de transmissão, medida em pacotes/segundo;

De forma geral, o modelo MARCO considera uma PLIM para definir as configurações ideais dos parâmetros SF e CF, a qual é explicada a seguir. A função objetiva da Eq. 14 encontra a utilização do canal LoRaWAN com o menor custo possível. Para isso, é considerado o tempo necessário para transmitir um *frame* e a vazão. O custo do canal será calculado por $(ToA_{sf} \times \lambda)$ e a variável de decisão $\vartheta_{d,sf,cf}$ irá decidir qual SF sf e CF cf usar para o dispositivo d . Para garantir que será obtido uma rede viável, MARCO usa parâmetros e características encontradas em redes LoRaWAN reais. A Eq. 15 garante que o dispositivo selecionado tenha potência suficiente para utilizar um determinado SF. Para determinar $\delta_{d,sf}$, cada d compara cada sf com os valores na Tabela 2. A Eq. 16 assegura que a alocação de recursos tenha sido feita apropriadamente para todos os dispositivos e que a quantidade de dispositivos será a definida a priori. A Eq. 17 assegura a quantidade de SF utilizados de acordo com o vetor de prioridade, previamente calculado. As Eqs. 18 e 19 realizam a alocação de canais, considerando a redução de colisões de SF no mesmo canal, respectivamente.

$$\text{Min}_U \quad U = \sum_{d \in L} \sum_{sf \in SF} \sum_{cf \in CF} \vartheta_{d,sf,cf} \times (ToA_{sf} \times \lambda) \quad (14)$$

sujeito a

$$\sum_{sf \in SF} \sum_{cf \in CF} \vartheta_{d,sf,cf} \times \delta_{d,sf} = 1, \quad \forall d \in L, \quad (15)$$

$$\sum_{d \in L} \sum_{sf \in SF} \sum_{cf \in CF} \vartheta_{d,sf,cf} = N, \quad (16)$$

$$\sum_{cf \in CF} \sum_{d \in L} \vartheta_{d,sf,cf} \times \delta_{d,sf} = N \times Priori_{sf}, \quad \forall sf \in SF \quad (17)$$

$$\sum_{d \in L} (\vartheta_{d,sf,cf} - \vartheta_{d,sf,cf-c}) \leq 1, \quad \forall sf \in SF, \forall cf \in CF, \forall c \in \{1..(cf-1)\}, \quad (18)$$

$$\sum_{d \in L} (\vartheta_{d,sf,cf} - \vartheta_{d,sf,cf+c}) \leq 1, \quad \forall sf \in SF, \forall cf \in CF, \forall c \in \{1..(8-cf)\} \quad (19)$$

4. Avaliação

Essa seção apresenta a avaliação do MARCO, incluindo metodologia, métricas, e resultados em termos de DER, número de colisões de pacotes, ToA, e consumo de energia.

4.1. Metodologia

O modelo foi implementado em *Optimization Programming Language* (OPL) e resolvido usando o IBM CPLEX solver 12.6 em um computador com Intel(R) Xeon(R) Silver 4112 CPU @ 2.60GHz, 64 GB de RAM no sistema operacional Ubuntu Server. O limite de tempo de resolução do CPLEX foi definido em 1h, mas todos os cenários considerados a PLIM convergiu antes de chegar no limite. Por exemplo, MARCO convergiu em 34 minutos, em média, para o cenário com 3000 dispositivos. Para o cenário, foi considerado um GW com raio R_a de 1,5 km, e foram implantados N dispositivos de forma uniforme nesta área, onde variou-se o N de 100 a 3000 dispositivos. Todos os dispositivos produzem o mesmo tráfego em dois cenários distintos: *i*) uma aplicação com uma taxa de tempo médio de envio relativamente baixa, ou seja, um pacote a cada 16 minutos (min). Por exemplo, dados enviados por medidores inteligentes de gás e eletricidade; *ii*) aplicação com mais transmissões por dia, ou seja, um pacote a cada 5 minutos. Por exemplo, uma aplicação de automação residencial. Para avaliar a efetividade do modelo MARCO foram realizados vários experimentos através do simulador *LoRaSim* [Bor et al. 2016]. A Tabela 3 apresenta os parâmetros de simulação comuns a todas as execuções.

Tabela 3. Principais Parâmetros da Simulação

Parâmetro	Valor
CR	4/5
BW	125 kHz
TX	14 dBm
Números de GW	1
Números de IoT devices	{100, 500, 1000, 1500, 2500 e 3000}
Tempo de Transmissão	{16 e 5} min
Tamanho do Pacote	20 bytes

Foram realizadas simulações comparando o modelo MARCO e quatro heurísticas de alocação de recursos em LoRaWAN. A heurística ADR ajusta parâmetros de SF, DR, BW e CR, de acordo com a distância e obstáculos físicos na transmissão. A especificação LoRaWAN não sugere uma implementação específica da heurística de ADR, e para esse trabalho foi considerada a implementação fornecida pela *The Things Network*, *i.e.*, a maior rede pública LoRaWAN [noa 2019]. A heurística Menor_Tempo é uma atribuição padrão usada pelos dispositivos que atribui um CF e SF fixos para que os pacotes tenham o tempo mínimo de ToA. A heurística Aleatório atribui aleatoriamente os valores de CF e SF, com o objetivo de reduzir transmissões simultâneas. A heurística Distro_Justo distribui o número de dispositivos finais igualmente entre os valores de CF e SF. Por fim, o MARCO ajusta os valores de SF e CF conforme apresentado na Seção 3.

Foram utilizadas quatro métricas para avaliar o desempenho do modelo e/ou heurísticas de alocação de recursos do LoRaWAN, nomeadamente, DER, número de colisões, ToA e consumo de energia. O DER avalia o desempenho em um intervalo numérico entre 0 e 1 calculado conforme Eq. 20, no qual, nas implantações ótimas de rede, o valor é igual a 1. Para o cálculo do DER é necessário contar o número de pacotes recebidos P_r , o número de colisões de pacotes Col e o número total de pacotes enviados P_{total} . O DER não captura o desempenho de um dispositivo individual ele é uma métrica

que analisa a implantação da rede como um todo, em que o DER é severamente afetado pelo número de colisões [Bor et al. 2016].

$$DER = \frac{P_r - Col}{P_{total}} \quad (20)$$

Define-se colisões quando dois ou mais dispositivos da rede tentam enviar dados simultaneamente com o mesmo SF no mesmo CF, resultando em colisões e possível perda de dados transmitidos, causando um efeito negativo no desempenho do sistema. Quando duas transmissões LoRaWAN ocorrem ao mesmo tempo, é determinado que o receptor pode decodificar pacotes recebidos simultaneamente, analisando as condições CF, SF, energia e tempo. O ToA foi calculado conforme a Eq. 4, o qual ajuda a analisar o tempo de envio da transmissão do pacote. O consumo de energia é definido como a energia gasta pela rede para extrair uma mensagem com êxito, considerando todos os dispositivos.

4.2. Resultados

A Figura 2 apresenta os resultados de DER para diferentes números de dispositivos na rede usando o tempo máximo de transmissão de 5 e 16 minutos para a alocação de recurso do MARCO, ADR, Menor_Tempo, Aleatório e Distro_Justo. Observa-se com os resultados da Figura 2(a) que o MARCO tem um DER 3% melhor em relação ao ADR, e 9% melhor que o Aleatório, ou seja, o MARCO consegue entregar mais pacotes com menor número de colisões. Isso deve-se ao fato que o MARCO encontra os valores ótimos de SF e CF para melhor utilização do canal, ou seja, garante que os dispositivos utilizem o valor de SF de acordo com o vetor de prioridade no CF correspondente. O desempenho inferior do ADR e do aleatório deve-se a ausência de um vetor de prioridade, assim sempre a rede estará desbalanceada em termos de proporcionalidade de SF. O Menor_Tempo é muito pior que os demais, pois há uma grande quantidade de dispositivos com o mesmo SF no mesmo canal, causando um maior número de colisões. Por outro lado, na Figura 2(b) pode ser observado que com um tempo máximo de transmissão por dispositivo reduzido a 5 min, ou seja mais transmissões por dia, houve uma diminuição no desempenho em termos de DER para a análise realizada, em especial para os cenários mais densos. Ainda assim, o MARCO tem desempenho 12% melhor em comparação ao ADR e 19% superior em relação ao Aleatório, ambos utilizando o cenário com maior número de dispositivos. O Menor_Tempo é muito pior que os demais em ambos os cenários, pois há uma grande quantidade de dispositivos com o mesmo SF no mesmo canal, causando um maior número de colisões.

A Figura 3 apresenta a média de colisões para diferentes números de dispositivos na rede usando o tempo máximo de transmissão de 5 e 16 minutos para alocação de recurso com os modelos avaliados. Por meio dos resultados da Figura 3(a), verifica-se que o número de colisões por dispositivo para o MARCO é 2 vezes menor que o de segundo melhor desempenho, *i.e.*, ADR, 2,39 vezes menor que o Menor_Tempo e aproximadamente 4 vezes menor que o Aleatório. O número de colisões elevadas do ADR e Menor_Tempo deve-se ao fato que eles alocam o mesmo SF para transmissões simultâneas, e assim o GW será incapaz de decodificar corretamente os sinais simultâneos enviados pelos dispositivos usando o mesmo SF no mesmo canal. Por fim, o Distro_Justo acumula muito dispositivos com altos SFs, e o tempo de transmissão é muito alto, havendo muitas

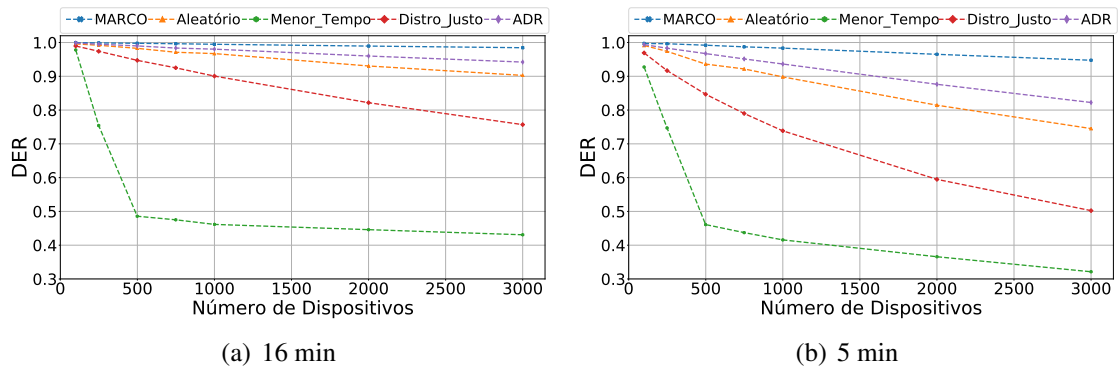


Figura 2. DER para Diferentes Números de Dispositivos

colisões principalmente nos SF 11 e 12. Similarmente, na Figura 3(b) é possível notar que reduzindo o tempo de transmissão de pacotes, ou seja, para 5 pacotes por minutos, observa-se que a curva do modelo e/ou heurísticas mantém um comportamento equivalente aos resultados que utilizam tempo de transmissão igual 16 min, sendo a ordem de desempenho mantida. No entanto, verifica-se uma ampliação de escala de colisões para todos os cenários simulados, uma vez que a mesma quantidade de pacotes serão enviadas em um tempo menor. Por exemplo, o número de colisões para o MARCO agora é de 3,36 vezes maior em comparação ao cenário da Figura 3(a), já o ADR tem aproximadamente 11 vezes mais colisões se comparado ao cenário anterior, usando 3000 dispositivos.

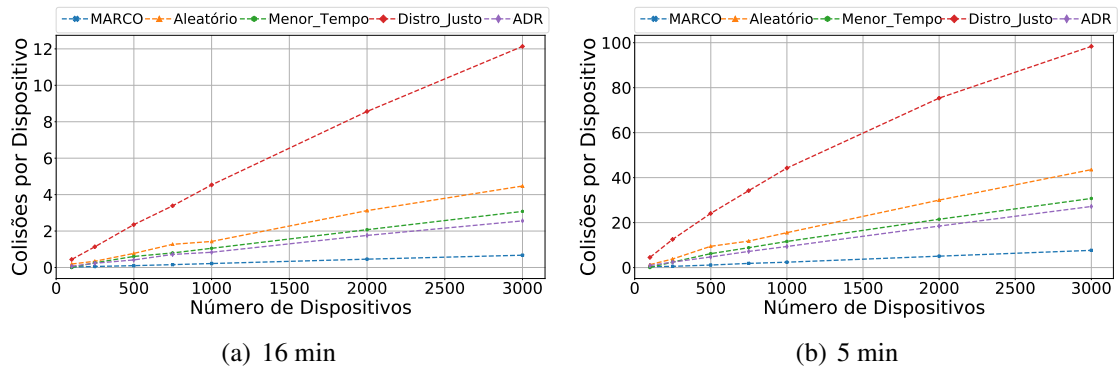


Figura 3. Média de Colisão de Pacotes para Diferentes Números de Dispositivos

Uma vez que a diferença entre os dois cenários é a taxa de transmissão, haverá diferenças na quantidade de colisões e no desempenho da rede entre eles. No entanto, não há influência na variação de SF/CF entre um cenário e outro. Assim, a Figura 4 apresenta o ToA e a distribuição de SF para diferentes números de dispositivos do modelo e/ou heurísticas avaliadas. Com base nos resultados da Figura 4(a), é possível observar que o MARCO possui o terceiro maior valor de ToA, com uma média de aproximadamente 120 segundos para o cenário com 3000 dispositivos, tempo adequado para atender os requisitos da aplicação. O ADR e o menor_Tempo possuem ToA menor que o MARCO, pois todos os dispositivos estão transmitindo no SF7, sendo que quanto menor o SF menor será o ToA. Contudo, isso ocasionará um maior número de colisões de pacotes transmitidos no mesmo CF e SF, conforme mostra os resultados da Figura 3. Por outro lado, o Aleatório e o Distro_Justo possuem os maiores valores de ToA, pois quanto maior o SF maior será o

ToA, mantendo o canal ocupado por um longo período de tempo, e assim aumentando as colisões. Além do mais, a Figura 4(b) mostra a distribuição dos SF para um cenário com 3000 dispositivos para os diferentes modelo e/ou heurísticas. Tanto o Aleatório quanto o Distro_Justo possuem gráficos semelhantes, mostrando que existe uma tendência em setar 500 dispositivos para cada SF. Para o ADR e o Menor_Tempo, a quantidade de SF são pontualmente idênticas, ou seja, todos no SF7 com o objetivo de ter o menor ToA, alterando apenas a forma como o CF é alocado. Por fim, o MARCO possui 40% dos dispositivos alocados no SF7, e poucos dispositivos usando SF12. Isso deve-se ao fato de que o MARCO prioriza transmissões no SF7 para reduzir as colisões por meio do vetor de prioridades. O MARCO também considera transmissões no SF12 apenas para dispositivos que estejam longe do *Gateway* de forma forma que o pacote seja recebido com o mínimo de sensibilidade.

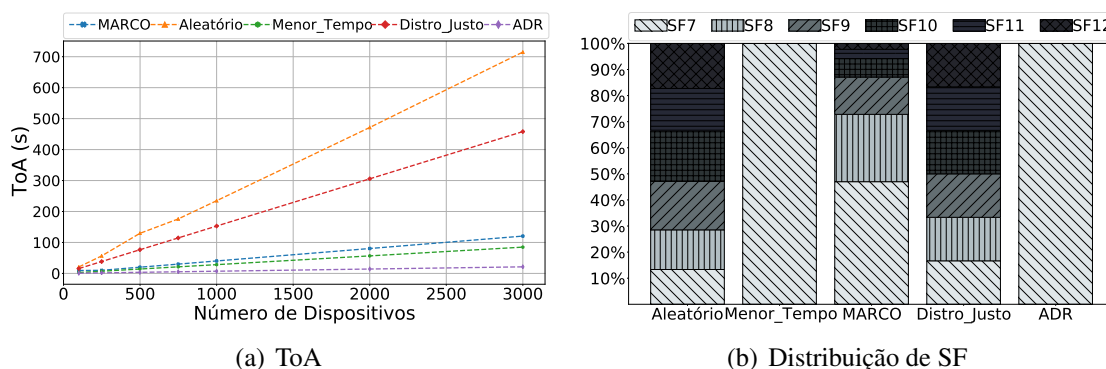


Figura 4. Distribuição de SF e ToA para Diferentes Números de Dispositivos

A Figura 5 ilustra a energia consumida total em mJ, em função dos diferentes números de dispositivos usando o tempo máximo de transmissão de 5 e 16 minutos. Com base nos resultados da Figura 5(a), é possível observar que o ADR possui o menor consumo de energia independente do número de dispositivos da rede, uma vez que ele configura estrategicamente alguns dispositivos para os SF menores, sendo que o consumo de energia é inversamente proporcional ao aumento do SF. Nesse sentido, o Menor_Tempo apresenta o segundo menor consumo, por deter de configuração de SF fixa nos menores valores para todos os dispositivos. Já o MARCO, manifesta-se como terceiro desempenho mais eficiente, uma vez que distribui os dispositivos proporcionalmente mesmo que seja possível alocar com um SF que consuma menos energia, mas fazendo isso afetará o DER da rede. O MARCO perde para o ADR e Menor_Tempo, pois distribui os SF conforme Eq. 13, e não possui uma quantidade excessiva de SF com valor 7 e 8. Desta forma, o MARCO é capaz de ganhar no desempenho da rede como um todo, mas perde por um consumo maior de energia. Ademais, na Figura 5(b) destaca-se o aumento comum de gasto de energia com o tempo de transmissão de pacotes 3,32 vezes menor, mantendo-se o padrão de comportamento para cada heurística com os diferentes número de dispositivos. O MARCO perde para o ADR e Menor_Tempo, pois distribui os SF conforme Eq. 13, e não possui uma quantidade excessiva de SF com valor 7 e 8. Desta forma, o MARCO é capaz de ganhar no desempenho da rede como um todo, mas perde por um consumo maior de energia.

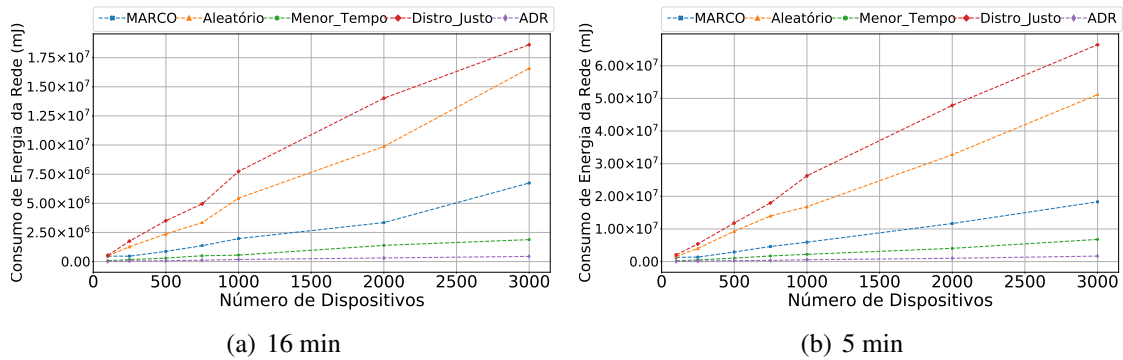


Figura 5. Consumo Energético para Diferentes Números de Dispositivos

5. Conclusão

A alocação de recursos é um aspecto fundamental em LoRaWAN, especialmente à medida que há uma densificação na rede. Este artigo introduz um modelo ótimo utilizando PLIM para alocação de recursos para LoRaWAN, chamado de MARCO. O modelo proposto ajusta os parâmetros de SF e CF do LoRaWAN, minimizando a utilização do canal, enquanto realiza um *tradeoff* entre melhorar QoS e redução das colisões. Os resultados obtidos por meio de simulações mostraram que o modelo MARCO provê uma ótima utilização do canal, melhorando a alocação dos valores SF e CF para reduzir colisões e melhorar o sistema como um todo. Especificamente, quando o modelo MARCO é usado em vez da heurística ADR, há uma melhora de até 3% no DER, para outras heurísticas essa diferença é ainda maior. Já para a quantidade de colisões, o modelo MARCO tem pelo menos 2 colisões a menos para cada dispositivo, se comparado ao usado pelo LoRaWAN. Em relação ao consumo energético da rede, apesar do modelo MARCO possuir o melhor DER, ele ainda possui o terceiro menor consumo energético. Como trabalho futuro, pretende-se desenvolver um novo modelo PLIM com outros parâmetros para levar em consideração outros fatores que também impactam em aplicações de IoT.

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

- (2019). Adaptive Data Rate. <https://www.thethingsnetwork.org/docs/lorawan/adaptive-data-rate.html>.
- Akpakwu, G. A., Silva, B. J., Hancke, G. P., and Abu-Mahfouz, A. M. (2018). A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges. *IEEE Access*, 6:3619–3647.
- Amichi, L., Kaneko, M., Fukuda, E. H., Rachkidy, N. E., and Guitton, A. (2019). Joint allocation strategies of power and spreading factors with imperfect orthogonality in lora networks. *arXiv preprint arXiv:1904.11303*.
- Bockelmann, C., Pratas, N., Nikopour, H., Au, K., Svensson, T., Stefanovic, C., Popovski, P., and Dekorsy, A. (2016). Massive machine-type communications in 5g: physical and mac-layer solutions. *IEEE Communications Magazine*, 54(9):59–65.

- Bor, M. and Roedig, U. (2017). Lora transmission parameter selection. In *13th Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, pages 27–34. IEEE.
- Bor, M. C., Roedig, U., Voigt, T., and Alonso, J. M. (2016). Do lora low-power wide-area networks scale? In *19th International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 59–67. ACM.
- Caillouet, C., Heusse, M., and Rousseau, F. (2019). Optimal SF Allocation in LoRaWAN Considering Physical Capture and Imperfect Orthogonality. In *Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Waikoloa, United States.
- Dawaliby, S., Bradai, A., and Pousset, Y. (2019). Network slicing optimization in large scale lora wide area networks. In *Proceedings of the IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*, pages 72–77. IEEE.
- Duda, A. and Heusse, M. (2019). Spatial issues in modeling LoRaWAN capacity. In *22nd International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, pages 191–198.
- El-Aasser, M., Elshabrawy, T., and Ashour, M. (2018). Joint spreading factor and coding rate assignment in lorawan networks. In *Global Conference on Internet of Things (GCIoT)*, pages 1–7. IEEE.
- Ertürk, M. A., Aydın, M. A., Büyükakkaşlar, M. T., and Evirgen, H. (2019). A survey on lorawan architecture, protocol and technologies. *Future Internet*, 11(10):216.
- Harinda, E., Hosseinzadeh, S., Larijani, H., and Gibson, R. M. (2019). Comparative performance analysis of empirical propagation models for lorawan 868mhz in an urban scenario. In *5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, pages 154–159. IEEE.
- Raza, U., Kulkarni, P., and Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2):855–873.
- Sandoval, R. M., Garcia-Sanchez, A.-J., and Garcia-Haro, J. (2019a). Optimizing and updating lora communication parameters: A machine learning approach. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, 16(3):884–895.
- Sandoval, R. M., Garcia-Sanchez, A.-J., and Garcia-Haro, J. (2019b). Performance optimization of lora nodes for the future smart city/industry. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1):1–13.
- Seller, O. B. A. (2017). Wireless communication method. US Patent 9,647,718.
- Yastrebova, A., Kirichek, R., Koucheryavy, Y., Borodin, A., and Koucheryavy, A. (2018). Future networks 2030: Architecture & requirements. In *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, pages 1–8. IEEE.
- Yousuf, A. M. et al. (2018). Throughput, coverage and scalability of LoRa LPWAN for internet of things. In *IEEE/ACM 26th International Symposium on Quality of Service*, pages 1–10.