

Nova proposta para quantificação de QoS em função das características de configuração LoRaWAN

Cristiano Neri da Silva, Jocines D. F. da Silveira, Pedro Felipe Ferreira de Abreu e José Valdemir dos Reis Junior

Resumo—Este artigo propõe determinar a quantidade de diferentes Qualidades de Serviço (QoS) analisando as características do conjunto de configurações LoRaWAN através da combinação dos métodos *gap statistic* com algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM) e *elbow* com K-means. Adicionalmente, realizou-se agrupamento com FCM baseado nas métricas *Bit Error Rate* (BER), *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) e *Time on Air* (ToA). Os resultados determinaram agrupamentos adequados conforme os diferentes tipos de QoS baseado na combinação dos métodos, enquanto o FCM permitiu agrupar as aplicações com QoS similares, possibilitando planejar a seleção das configurações adequada aos requisitos das aplicações.

Palavras-Chave—LoRaWAN, QoS, FCM, K-means, Elbow, Gap Statistic.

Abstract—This paper proposes to determine the number of different Quality of Service (QoS) by analyzing the characteristics of the set of LoRaWAN configurations by combining the gap statistic with Fuzzy C-Means (FCM) and elbow with K-means algorithm methods. Additionally, grouping was performed with FCM based on the Bit Error Rate (BER), Received Signal Strength Indicator (RSSI), and Time on Air (ToA) metrics. The results determined appropriate groupings according to the different types of QoS based on the combination of methods, while FCM allowed grouping the applications with similar QoS.

Keywords—LoRaWAN, QoS, FCM, K-means, Elbow, Gap Statistic.

I. INTRODUÇÃO

A Internet das Coisas (Internet of Things – IoT) pode ser conceituada como uma rede aberta e abrangente de objetos inteligentes com capacidade de auto-organização, compartilhamento de informações, reagindo e agindo diante de situações e mudanças no ambiente [1]. Nesse contexto, as *Low Power Wide Area Network* (LPWAN) podem ser compreendidas como um conjunto de tecnologias que permitam comunicações entre dispositivos em áreas amplas. Dentre essas tecnologias, o Long Range (LoRa) [2] tem se destacado, pois oferece link de comunicação de longo alcance com baixo consumo de energia e alta confiabilidade. Seu protocolo de comunicação, padronizado pela LoRa Alliance [2], é conhecido como *LoRa Wide Area Network* (LoRaWAN) apresentando arquitetura em estrela e gateways para retransmissão das mensagens entre os dispositivos finais e uma rede central [3].

Ainda neste contexto, 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

Cristiano Neri da Silva, Jocines D. F. da Silveira e José Valdemir dos Reis Junior, Programa de Pós Graduação em Ciência da Computação (PPGCC) da Universidade Federal do Piauí-UFPI, Teresina (PI), e-mail: (cristiano.neri, jocines.silveira, valdemirreis)@ufpi.edu.br. Pedro Felipe Ferreira de Abreu, graduando em Ciência da Computação na UFPI, e-mail: pedroffda@ufpi.edu.br.

na comunicação [4], pois as aplicações possuem diferentes requisitos de QoS, necessitando de soluções que forneça QoS adequado aos requisitos de comunicação [5].

Assim, este artigo propõe determinar a quantidade de diferentes QoS baseado nas características das métricas BER, RSSI e ToA do conjunto de configuração LoRaWAN por meio da combinação dos métodos *gap statistic* com o algoritmo *Fuzzy C-Means* (FCM) e *elbow* com K-means, diferenciando de trabalhos anteriores que não utilizaram integração dos métodos. Adicionalmente, agrupou-se as configurações com o algoritmo FCM analisando as métricas BER, RSSI e ToA.

As principais contribuições deste artigo são: I) proposta e implementação da combinação dos métodos *gap statistic* com o FCM e *elbow* com K-means para determinar a quantidade de QoS; II) implementação do FCM para agrupar o conjunto de configuração LoRaWAN baseado nas características das métricas BER, RSSI e ToA; III) análise das características de QoS nos agrupamentos, possibilitando compreender os requisitos das aplicações.

Este trabalho é organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta o levantamento do estado da arte sobre métricas de QoS; na Seção III contextualiza sobre os métodos *elbow*, *gap statistic*, FCM, K-means utilizados; a Seção IV apresenta as métricas avaliadas BER, RSSI e ToA; a metodologia proposta no desenvolvimento do trabalho é relatada na Seção V, enquanto a Seção VI são discutidos os resultados obtidos das simulações e na Seção VII são descritas as conclusões.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Em [6], foi proposto um método para determinar o número de gateways LoRa e seu posicionamento que denominaram de Place. Os autores utilizaram o método *gap statistic* para estimar a quantidade de gateway e seu posicionamento através do FCM analisando as métricas de QoS *Packet Delivery Ratio* (PDR), despesas de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX). Os resultados mostram redução de 36% do CAPEX e OPEX em comparação ao grid25 composto de 25 gateways segmentando o cenário em grades de 2km.

Na análise de QoS em redes LoRaWAN composta por vários grupos de dispositivos que requerem diferentes Taxas de Perda de Pacotes (PLR) foram analisados em [7], no qual um modelo matemático foi proposto para estimar uma distribuição de PLR, concluindo que é inadequado utilizar apenas a média PLR na previsão da QoS, sendo desenvolvido um algoritmo para atribuir esquemas de modulação e codificação fornecendo PLRs abaixo dos limites exigidos pelo dispositivos.

O planejamento do posicionamento do gateway LoRa e configuração do dispositivo IoT foram analisados em [8],

formulando como um Problema Não Linear Inteiro Misto (MINLP). Os autores propuseram um algoritmo para planejar o posicionamento de forma eficiente utilizando pequenas redes devido à complexidade. Na simulação, a proposta apresentou uma melhoria de 15% e 20% no rendimento médio e eficiência energética comparado ao algoritmo ADR comumente usado em LoRaWAN.

Por fim, em [5] foi proposto o agrupamento do conjunto de configurações LoRaWAN utilizando o algoritmo FCM baseado nas métricas BER, ToA e RSSI, sendo definido a necessidade de executar três tipos de aplicação com diferentes QoS. Nos resultados, o FCM foi eficiente e capaz de agrupar as configurações para os três grupos esperados. No entanto, com as contribuições aqui propostas, possibilita-se determinar a quantidade de diferentes QoS baseado nas características do conjunto de configuração LoRaWAN aplicando a combinação dos métodos *gap statistic* com o algoritmo FCM e *elbow* com K-means bem como agrupar as configurações com o FCM que melhor se adapta aos requisitos das aplicações.

III. MÉTODOS DE AGRUPAMENTO

O processo de detecção de agrupamento de dados pode ser definido como a divisão de elementos em classes de maneira que os elementos dentro de uma mesma classe apresentem alta similaridade entre si [9]. Neste contexto, são descritos os métodos *Elbow*, *Gap Statistic*, K-Means e o *Fuzzy C-Means*.

A. Método Elbow

Este método consiste em determinar o número de grupos que pode ser obtido, mesmo sem conhecer a resposta previamente. As etapas do elbow para determinar o número de grupos k com algoritmo K-means são descritas a seguir [10].

- 1) Inicializa o valor de k ;
- 2) Incrementa k ;
- 3) Calcula a soma dos erros quadrados para cada k ;
- 4) Analisam os resultados do erro quadrado de k que tenha uma redução significativa;
- 5) Localize e defina o valor k em forma de cotovelo.

B. Método Gap Statistic

O método *gap statistic* foi proposto para solucionar o problema da escolha do número ótimo de grupos, calculando a distância entre os pontos que pertencem ao agrupamento com o propósito de encontrar o número ideal de grupos [11].

A ideia básica é descrita como se as unidades amostrais não formassem grupos, sua distribuição seria aproximadamente uniforme dentro das amplitudes das variáveis observadas. Com uma medida de erro apropriada e realizando uma padronização adequada, calcula-se a estatística *gap* que permite avaliar se a amostra obedece a um padrão [11].

C. K-Means

Trata-se de um algoritmo iterativo utilizado para formar agrupamentos em um conjunto informado, sendo descrito pelos passos a seguir [12].

Passo 1: Atribuem-se valores iniciais para os protótipos seguindo algum critério, por exemplo, sorteio aleatório desses valores dentro dos limites de domínio de cada atributo;

Passo 2: Atribuem-se cada objeto ao grupo cujo protótipo possua maior similaridade com o objeto;

Passo 3: Recalcula-se o valor da centróide (protótipo) de cada grupo, como sendo a média dos objetos atuais do grupo;

Passo 4: Repetem-se os passos 2 e 3 até que os grupos se estabilizem.

D. Fuzzy C-Means

O *Fuzzy C-Means* tem sido amplamente utilizado para clusterização, classificação e reconhecimento de padrões. O FCM é descrito a seguir [13].

Passo 1: Inicia a matriz de partição U com números aleatórios no intervalo $[0, 1]$.

Passo 2: Calcula o centro do grupo através da Equação (1) e a nova matriz de partição com a Equação (2), atualizando a matriz de associação inicializada $U = (u_{ij})$.

$$v_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m X_j}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^m}, 1 \leq i \leq c \quad (1)$$

$$u_{ij} = \left[\sum_{k=1}^c \left(\frac{\|X_j - V_i\|^2}{\|X_j - V_k\|^2} \right)^{\frac{2}{m-1}} \right]^{-1} \quad (m > 1) \quad (2)$$

Passo 3: Calcula a função objetivo com a Equação (3).

$$J = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^n u_{ij}^m \|X_j - V_i\|^2 \quad (3)$$

Passo 4: Dado $\epsilon > 0$, se $|J^{(n)} - J^{(n-1)}| < \epsilon$, o processo é encerrado, caso contrário retorna para o passo 2.

IV. MÉTRICAS AVALIADAS

Nesse trabalho, a QoS da rede é avaliada em relação as métricas Sensibilidade do Receptor (RS), Taxa de Erro de Bit (BER) e Tempo no Ar (ToA) descritas a seguir, tendo como referências os requisitos das aplicações IoT de [5].

A. Receiver Sensitivity (RS)

A Sensibilidade do Receptor (RS) é a propriedade inerente da capacidade de um sistema extrair informações de sinais, podendo ser quantificado como a menor intensidade do sinal que pode acionar o sistema para a resolução de seu pacote, sendo calculada pela Equação (4) [14].

$$RS = -174 + 10 \log_{10} BW + NF + SNR \quad (4)$$

Onde BW é a largura de banda, NF a figura do ruído e SNR a relação sinal ruído.

B. Bit Error Rate (BER)

A Taxa de Erro de Bits (BER) é a porcentagem de bits que apresenta erro em relação ao número total de bits enviados em uma transmissão, conforme Equação (5) [15].

$$BER = \frac{\text{Número de bits com erro}}{\text{Número total de bits enviados}} \quad (5)$$

C. Time on Air (ToA)

O Tempo no Ar (ToA) em LoRaWAN é o tempo que um pacote leva para ser demodulado com sucesso baseado na Equação (6), cujo valor de G é calculado pela Equação (7)[14].

$$ToA = \frac{2^{SF}}{BW} ((NP + 4.25) + (SW + \max(G, 0))) \quad (6)$$

$$G = \left[\frac{8PS - 4SF + 28 + 16CRC - 20IH}{4(SF - 2DE)} \right] (CR + 4) \quad (7)$$

onde tem-se:

- Número de símbolos do preâmbulo (NP) = 8 se LoRa, 5 se é a GFSK (Gaussian Frequency Shift Keying).
- Sincronização da palavra (SW) = 8 se LoRa, 3 se GFSK;
- Verificação de redundância cíclica (CRC) = 1 se for pacote de uplink, 0 outro;
- IH é o cabeçalho implícito, IH é 0 se o cabeçalho estiver ativo, caso contrário 1;
- DE é a otimização da taxa de dados, sendo DE = 1 se ADR ativo, 0 outro.

Na simulação, para geração do conjunto de configurações as métricas RSSI, BER e ToA foram calculadas baseadas nas Equações 4, 5 e 6 por meio de uma função criada no software Matlab, adotando os valores de NP e SW iguais a 8.

V. METODOLOGIA

O presente trabalho propõe determinar a quantidade de diferentes QoS baseado nas características de configuração LoRaWAN aplicando a combinação dos métodos *gap statistic* com o algoritmo FCM e *elbow* com K-means analisando as métricas BER, RSSI e ToA bem como realizar agrupamentos do conjunto utilizando o FCM. Foram utilizadas as mesmas métricas de [5]. Destaca-se que as métricas consumo de energia e latência serão abordadas em trabalhos futuros.

A metodologia é composta de três etapas, vide Figura 1, em que a primeira etapa consiste na geração do conjunto de configurações da rede LoRaWAN, no qual os parâmetros BW, SF, PS e SNR foram entradas para uma função criada no Matlab baseado nos valores da Tabela I, sendo as métricas RSSI, BER e ToA calculadas baseadas nas Equações 4, 5 e 6.

TABELA I
PARÂMETROS DE TRANSMISSÃO LORA [5].

Parâmetros	Valores
$BW_{(kHz)}$	125, 250, 500
SF	7, 8, 9, 10, 11, 12
$PS_{(B)}$	10, 30, 50, 70, 90, 110, 130
$SNR_{(dB)}$	-20, -15, -10, -5, 0, 5, 10

Na segunda etapa, a quantidade de diferentes QoS foi determinada aplicando a combinação dos métodos *gap statistic* com FCM e *elbow* com K-means sobre o conjunto de configurações LoRaWAN analisando as características das métricas BER, RSSI e ToA. Foram realizadas 33 simulações baseado em [6] e o número de QoS variou de 2 a 30, sendo extraída a média que representa distintos QoS.

Na terceira etapa, utilizou-se o algoritmo FCM com o número de QoS e o conjunto de configurações LoRaWAN, visando formar grupos baseados nas propriedades de similaridades das aplicações, realizando também 33 simulações.

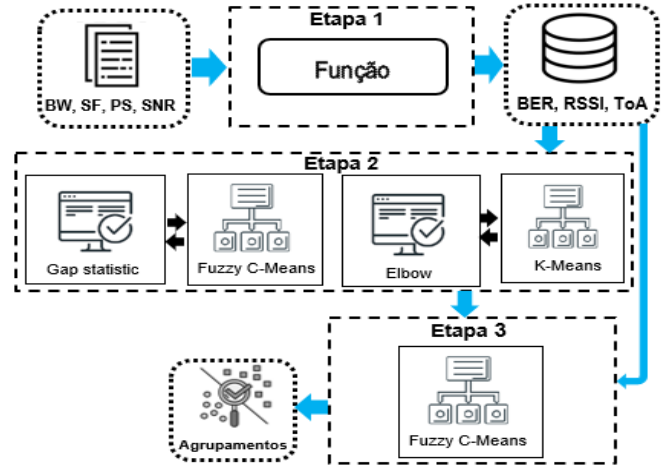


Fig. 1. Metodologia proposta para determinar o número de QoS.

Assim, objetiva-se determinar a quantidade de distintos QoS baseado nas características do conjunto de configurações LoRaWAN como também realizar agrupamentos do conjunto analisando as métricas BER, RSSI e ToA, possibilitando estabelecer os mesmos requisitos de QoS para um agrupamento composto de diferentes aplicações IoT que possuam propriedades similares.

A escolha dos métodos justifica-se devido que na combinação do *gap statistic* com FCM, o gap compara o valor da função objetivo do conjunto de configuração LoRaWAN com de outra distribuição aleatória, retornando informações como os dados estão organizados comparado ao grupo desorganizado. Espera-se menor variação entre as características das aplicações nos grupos por meio dos valores das métricas, possibilitando definir o número de QoS. O método *elbow* com K-means relaciona o número de QoS baseado no somatório dos erros quadráticos entre a centroide e cada elemento que pertence ao grupo. Com isso, objetiva-se descobrir similaridades entre as métricas e agrupá-las, estabelecendo a quantidade de QoS por meio da redução do erro quadrático.

Nos agrupamentos, analisou-se o grau de pertinência da matriz U_{ij} do FCM que representa a associação das características das aplicações para cada grupo, por exemplo, uma aplicação próxima ao centro de um grupo terá um elevado grau de associação e outra distante um baixo grau de pertinência.

VI. RESULTADOS

O número de grupos k é um parâmetro de entrada fornecido pelo usuário e encontrar um valor adequado depende do problema dos dados pouco conhecido, a priori [16]. Assim, considerou-se k variando de 2 a 30 que representa a quantidade de distintos QoS a serem determinadas e cada grupo é composto por aplicações com os mesmos requisitos de QoS.

A combinação *gap statistic* com FCM, conforme Figura 2, verifica-se que o índice de clusterização estabeleceu $k = 4$

ao maximizar o valor do gap analisando os resultados da função objetivo, que estima a adequação entre os elementos e os agrupamentos. Na Figura 3, a combinação do método *elbow* com K-means definiu $k = 4$ quando os erros quadráticos obtiveram uma redução significativa entre a centroide e cada elemento do grupo formando um cotovelo.

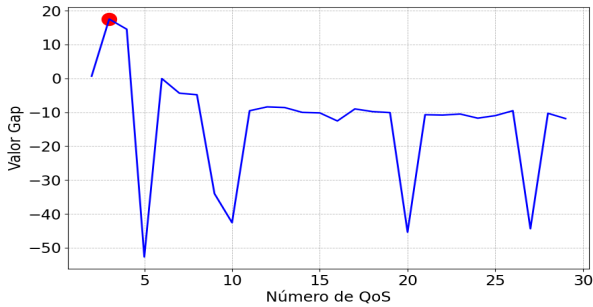


Fig. 2. Números de QoS combinando o método *gap statistic* com FCM.

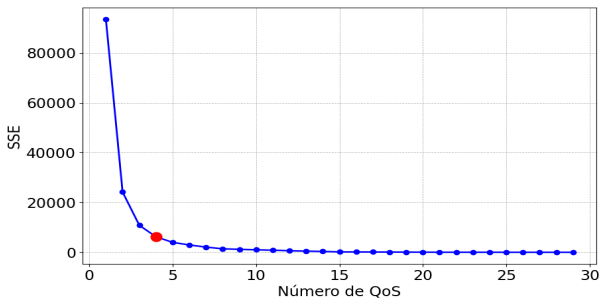


Fig. 3. Números de QoS combinando o método *elbow* com K-means.

Na análise das métricas ToA, RSSI e BER conforme a Figura 4, observou-se uma segmentação por RSSI, sendo que C0 apresentou RSSI entre -127.03dBm e -121.01dBm com BER variando de 0.37% a 0.61% vide resumo na Tabela II, com a intensidade superior ao C3 e inferiores aos grupos C1 e C2. O C1 apresentou RSSI variando -109.02dBm a -101.01dBm com BER de 0.43% a 0.59%, caracterizando conjunto de aplicações com alta sensibilidade de RSSI e BER abaixo de 0.60%. Por outro lado, o C3 obteve sinal mais fraco de -137.03dBm a -129.02dBm com BER entre 0.36% a 0.68%, agrupando aplicações com baixa sensibilidade a RSSI e maior variação do BER. O C2 apresentou RSSI de -119.02dBm a -111.01dBm, sendo inferior ao C1, e BER entre 0.39% a 0.65% conforme demonstrado na Tabela II. Essa segmentação possui o segundo sinal mais forte de RSSI, possibilitando o uso para aplicações com sensibilidade abaixo de -119.02dBm e BER menor que 0.65%. O ToA apresentou maior concentração das aplicações abaixo de 0.2 segundos nas quatro segmentações.

Dos resultados da BER, SNR e ToA, vide Figura 5, observou-se uma segmentação por SNR no qual valor elevado significa uma rede com poucos ruídos, em contra partida, um número baixo apresenta uma rede com quantia elevada de ruídos. O grupo C1 apresentou a melhor SNR de 5dB e 10dB, agrupando aplicações com pouca interferência de ruídos, enquanto C3 apresentou menores SNR de -20dB e -15dB, segmentando aplicações com alta interferência de ruídos, já C0

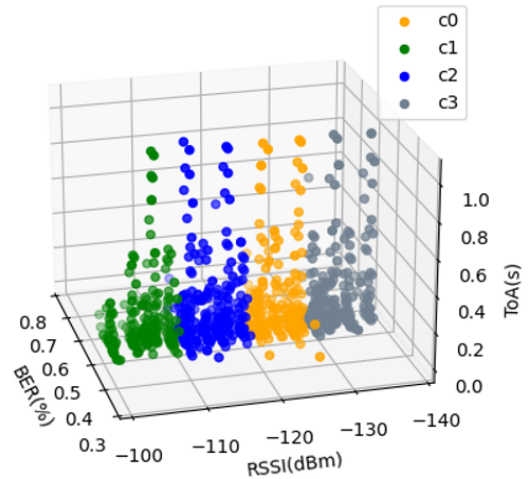


Fig. 4. Relação entre BER por RSSI e ToA.

resultou em SNR de -15dB, -10dB e -5dB possuindo menos ruído que C3, o C2 utilizou SNR de -5dB, 0dB e 5dB, sendo o segundo grupo com menos interferência de ruído.

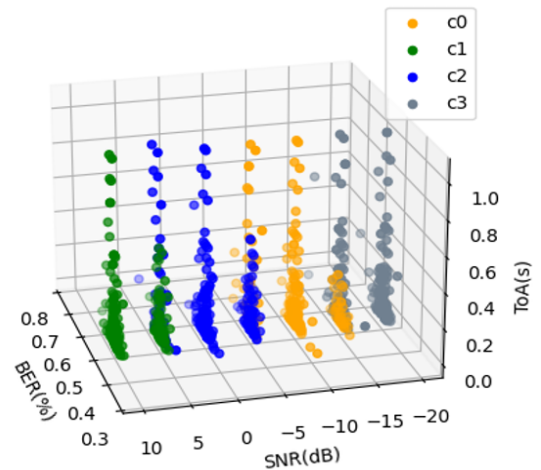


Fig. 5. Relação entre BER por SNR e ToA.

Ao comparar os resultados obtidos com os de [5], que estabeleceu a necessidade de executar três tipos de aplicação com diferentes QoS, verifica-se que a metodologia proposta determinou quatro diferentes QoS por meio da combinação dos métodos *gap statistic* com o algoritmo FCM e *elbow* com K-means. Verificou-se que não ocorreram variações até a terceira casa decimal nos grupos para as 33 simulações realizadas.

TABELA II
COMPARAÇÃO ENTRE ABORDAGEM [5] E A METODOLOGIA PROPOSTA.

Parâmetros	Abordagem [5]	Proposta
BER(%)	C0: 0.36 a 0.68 C1: 0.41 a 0.61 C2: 0.39 a 0.65	C0: 0.37 a 0.61 C1: 0.43 a 0.59 C2: 0.36 a 0.68 C3: 0.39 a 0.65
Média BER(%)	C0: 0.50 C1: 0.50 C2: 0.49	C0: 0.49 C1: 0.49 C2: 0.50 C3: 0.50

Analisando a média da RSSI, vide Figura 6, observou-se que a metodologia proposta apresentou maior segmentação do RSSI, sendo que C1 obteve sinal forte com -105.41dBm , agrupando aplicações com alta sensibilidade ao RSSI, enquanto C3 a menor intensidade com -132.62dBm segmentando aplicações como baixa sensibilidade. O C2 desse trabalho apresentou sinal mais fortes com -114.02dBm em relação aos agrupamentos C0 e C2 de [5]. Já C1 da abordagem [5] resultou na segunda intensidade mais forte com -107.16dBm e C0 obteve -130.88dBm , sendo a segunda menor intensidade.

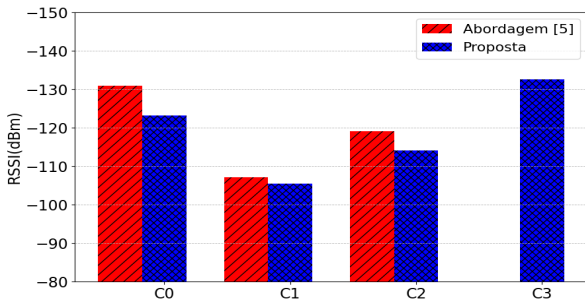


Fig. 6. Resultado comparativo em relação a média da RSSI.

Da análise comparativa da média ToA, vide Figura 7, observou-se que a metodologia proposta obteve menor ToA com 0.152s em C1, segmentando aplicações que possam tempo reduzido para transmitir, enquanto o C3 resultou no maior ToA agrupando aplicações no qual o fator tempo não seja crítico e o C2, desse trabalho, apresentou menor ToA com 0.182s comparado ao C0 de [5]. Já C1 da abordagem [5] resultou no segundo menor ToA propiciando o uso por aplicações que necessitam de ToA até 0.163s e a segmentação C0 obteve o segundo maior ToA com 0.195s . A média da BER apresentou percentual semelhante para abordagem [5] e na metodologia proposta conforme Tabela II.

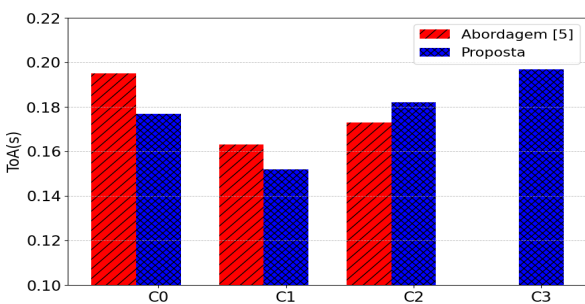


Fig. 7. Resultado comparativo em relação a média ToA.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs determinar a quantidade de diferentes QoS baseados nas características do conjunto de configurações LoRaWAN utilizando a combinação de métodos baseados nos parâmetros LoRa (SF, BW e PS), condições da rede via SNR e métricas de desempenho (BER, RSSI e ToA) exigidos pelas aplicações IoT. Adicionalmente, realizaram-se agrupamentos explorando as propriedades de similaridades do conjunto de configurações LoRaWAN.

A principal contribuição deste trabalho foi estabelecer o número de diferentes QoS e mapear os parâmetros de configurações que melhor se adaptam aos requisitos das aplicações baseado na QoS. Neste contexto, os resultados da nova metodologia proposta determinaram 4 agrupamentos representando distintos QoS por meio da combinação dos métodos *gap statistic* com FCM e *elbow* com K-means e a aplicação do algoritmo FCM permitiu agrupar as aplicações com propriedades de similaridades em função da QoS, possibilitando a seleção das configurações adequada aos requisitos das aplicações. Em trabalho futuro, é possível explorar o comportamento de outras métricas como consumo de energia, latência, PDR.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Y. Zhong, X. Xu, E. Klotz, and S. T. Newman, "Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616–630, 2017.
- [2] L. F. Ugarte, M. C. Garcia, E. O. Rocheti, E. Lacusta, L. S. Pereira, and M. C. de Almeida, "LoRa communication as a solution for real-time monitoring of iot devices at unicamp," in *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [3] J. D. F. da Silveira, T. R. Martins, C. N. da Silva, and J. V. dos Reis, "New solution based on fuzzy system for planning iot communication infrastructure for rural areas," in *2021 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*. IEEE, 2021, pp. 1–6.
- [4] C. Caillouet, M. Heusse, and F. Rousseau, "Optimal sf allocation in lorawan considering physical capture and imperfect orthogonality," in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [5] A. Djoudi, R. Zitouni, N. Zangar, and L. George, "Reconfiguration of lora networks parameters using fuzzy c-means clustering," in *2020 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [6] N. Matni, J. Moraes, D. Rosário, E. Cerqueira, and A. Neto, "Optimal gateway placement based on fuzzy c-means for low power wide area networks," in *2019 IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [7] D. Bankov, E. Khorov, and A. Lyakhov, "An algorithm to satisfy the qos requirements in a heterogeneous lorawan network," in *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. IEEE, 2020, pp. 1–6.
- [8] B. Ousat and M. Ghaderi, "LoRa network planning: Gateway placement and device configuration. in proceedings of the ieee international congress on internet of things (iciot 2019)," 2019.
- [9] J. A. d. Souza, "Agrupamento de dados complexos para apoiar consultas por similaridade com tratamento de restrições," Ph.D. dissertation, Universidade de São Paulo.
- [10] R. Nainggolan, R. Perangin-angin, E. Simarmata, and A. F. Tarigan, "Improved the performance of the k-means cluster using the sum of squared error (sse) optimized by using the elbow method," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1361, no. 1. IOP Publishing, 2019, p. 012015.
- [11] M. Mohajer, K.-H. Englmeier, and V. J. Schmid, "A comparison of gap statistic definitions with and without logarithm function," *arXiv preprint arXiv:1103.4767*, 2011.
- [12] A. Fontana, M. C. Naldi *et al.*, "Estudo e comparação de métodos para estimação de números de grupos em problemas de agrupamento de dados." 2009.
- [13] K.-s. Zhang, B.-n. Li, J. Xu, and L.-b. Wu, "New modification of fuzzy c-means clustering algorithm," in *Fuzzy Information and Engineering*. Springer, 2009, pp. 448–455.
- [14] S. V. Akram, R. Singh, M. A. AlZain, A. Gehlot, M. Rashid, O. S. Faragallah, W. El-Shafai, and D. Prashar, "Performance analysis of iot and long-range radio-based sensor node and gateway architecture for solid waste management," *Sensors*, vol. 21, no. 8, p. 2774, 2021.
- [15] A. Mahrokhzad, "Internet-of-things applications in the industry, healthcare, and environment," Ph.D. dissertation, Politecnico di Torino, 2021.
- [16] D. Garlisi, A. Martino, J. Zouwayhed, R. Pourrahim, and F. Cuomo, "Exploratory approach for network behavior clustering in lorawan," *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, pp. 1–15, 2021.