

Soluções otimizadas para implantação de redes militarizadas 4G/LTE com máxima cobertura e mínima interferência

Emerson de O. Antunes¹, Geraldo P. Rocha Filho² (Orientador)

¹Universidade de Brasília (UnB)

²Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia (UESB)

emerson.antunes@aluno.unb.br, geraldo.rocha@uesb.edu.br

Resumo. *Nesta dissertação, propomos resolver o problema de localização de cobertura máxima do Centro de Coordenação de Operações Móvel (CCOp Mv), que visa apoiar o comando operacional do Exército Brasileiro. Em razão disso, foi proposta uma modelagem analítica baseada no problema linear inteiro misto que orientou duas soluções de otimização: (i) E-ALLOCATOR – Exact ALLOCATiOn seRvice; e (ii) M-ALLOCATOR – Metaheuristic ALLOCATiOn seRvice. As soluções foram avaliadas em um cenário que emprega o CCOp Mv em apoio a uma operação de resgate baseada na tragédia de janeiro de 2019 em Brumadinho-MG e comparadas com uma heurística. Os resultados da avaliação de desempenho evidenciam eficiências em termos de qualidade e economia de recursos das duas soluções. Além disso, o E-ALLOCATOR provou ser adequado para cenários com baixa carga de trabalho, já o M-ALLOCATOR, para cenários com alta carga de trabalho, fornecendo soluções quase ótimas dentro do tempo computacional adequado para todas as instâncias do problema.*

Abstract. *In this Master's thesis, we propose to solve the maximal covering location problem of the Mobile Operations Coordination Center (CCOp Mv), which aims to support the operational command of the Brazilian Army. For this reason, analytical modeling based on the mixed-integer linear problem was proposed that guided two optimization solutions: (i) E-ALLOCATOR – Exact ALLOCATiOn seRvice; and (ii) M-ALLOCATOR – Metaheuristic ALLOCATiOn seRvice. The solutions were evaluated in a scenario that employs CCOp Mv to support a rescue operation based on the tragedy in January 2019 in Brumadinho-MG and compared with a heuristic. The performance evaluation results show evidence of efficiencies in terms of quality and resource savings of the proposed solutions. Furthermore, E-ALLOCATOR has been proven to be suitable for a low workload on the network. At the same time, M-ALLOCATOR is suitable for scenarios with a high workload providing almost optimal solutions within the adequate computational time for all problem instances.*

1. Introdução

O posicionamento e a configuração das Estações Transceptoras Base, do inglês *Base Transceiver Station* (BTS), não são apenas cruciais para o desempenho das redes rádio celulares, mas também são uma das etapas que compõem o processo de planejamento desses sistemas de comunicação. De acordo com [Mathar and Niessen 2000], podemos

resumir o planejamento de uma BTS em três etapas principais: (i) prever a área de cobertura definida por modelos empíricos de propagação; (ii) descrever analiticamente o tráfego demandado pelo serviço prestado; e (iii) determinar seu posicionamento e suas configurações. Cada etapa traz uma nova complexidade para planejar uma BTS, assim, os Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) foram propostos como forma de automatizar o processamento das informações necessárias para o melhor posicionamento e descoberta da melhor configuração para esses equipamentos [Costa 2016, Atta et al. 2018, Alizadeh et al. 2021].

Em relação ao SAD, a idealização do projeto Centro de Coordenação de Operações Móveis (CCOp Mv) visa a criação de um centro de comando e controle para apoiar o comando operacional do Exército Brasileiro. Diferentemente das tradicionais redes de acesso rádio baseadas em estações de base fixas, as BTSs do CCOp Mv são veículos militares equipados com diferentes tipos de enlaces de comunicação. A 4ª Geração do Sistema de Telefonia Móvel também designada por Padrão de Longa Duração, do inglês *Long Term Evolution* (4G/LTE), prevalece entre as tecnologias de comunicação disponíveis. A mobilidade na infraestrutura permite que a rede de acesso via rádio se adapte dinamicamente para melhorar a eficiência espectral e reduzir o consumo de energia de transmissão. Embora não seja fixo, definir a melhor posição geográfica desses veículos em campo para permitir cobertura adequada para operações militares que requerem comunicação por meio da 4G/LTE não é uma tarefa trivial. Esta tarefa faz parte do planejamento do melhor posicionamento e configuração das BTSs e é tratada como uma derivação do Problema de Localização de Cobertura Máxima, do inglês *Maximal Covering Location Problem* (MCLP) [Church and ReVelle 1974]. O MCLP é um problema NP-completo, cujo objetivo é criar uma área de cobertura para atender o maior número de pontos de demanda apresentados.

Diferentes SADs foram propostos para lidar com o MCLP. Por um lado, soluções propostas na literatura sugerem melhorias para lidar com MCLP geralmente sem considerar particularidades de aplicações com domínios específicos [Mehboob et al. 2016, Atta et al. 2018]. Por outro lado, existem algumas abordagens que exploram aplicações MCLP com domínios específicos, como a implantação de garagens de veículos [Gazani and Niki 2021], alocação de antenas [Costa 2016] ou mesmo veículos de comunicação [Yang et al. 2020] aplicados em operações de resgate. Em [Costa 2016, Atta et al. 2018, Alizadeh et al. 2021], as soluções visam maximizar a cobertura considerando exclusivamente o problema de posicionamento de antenas que impactam o desempenho da rede sem considerar outras características. Em contrapartida, os trabalhos de [Vallejo-Mora et al. 2018] e [Grochla and Slabicki 2019] exploram apenas a otimização da área de cobertura das redes já instaladas ajustando a potência de transmissão de suas BTSs sem determinar seus melhores posicionamentos.

Como sugerido em [Kumar et al. 2021], problemas reais geralmente envolvem múltiplos objetivos. Guiados por esta premissa e visando determinar o posicionamento e a configuração das BTSs transportadas pelos veículos do CCOp Mv de forma mais realista, *i.e.*, envolvendo todas as variáveis possíveis que impactam o problema, é que este trabalho buscou investigar as soluções de otimização a partir de dois objetivos conflitantes. Eles são (i) a maximização da cobertura e (ii) a minimização da interferência entre os sinais das BTSs. Do exposto, fica evidente que o nosso problema consiste em determinar o número

de veículos a serem utilizados, suas posições e as potências de transmissão configuradas em cada BTS que maximizem a área de cobertura e minimizem a interferência entre as células de comunicação criadas. Estas tarefas serão recorrentes para cada operação militar que deseje fazer uso dos serviços do CCOp Mv e intimamente ligadas às características do relevo e geografia do ambiente de emprego deste sistema de comunicação militar.

2. Objetivo

O principal objetivo da dissertação é propor, desenvolver e avaliar soluções de otimização que resolvam o problema de localização e configuração das BTSs do CCOp Mv.

3. Contribuição

A principal contribuição do mestrado é o desenvolvimento de soluções otimizadas para implantação de redes militarizadas para resolver o problema de localização das BTSs de acesso do CCOp Mv com máxima cobertura e mínima interferência. Para isso, foi apresentada a proposta de um modelo analítico fundamentada em Problemas Lineares Inteiros Mistos (PLIM). Esta modelagem se adequa à descrição dos cenários de avaliação e reflete matematicamente a influência das variáveis que coordenam o problema em estudo. A partir desta modelagem matemática é que foram fundamentadas as duas soluções de otimização propostas para a resolução do problema de localização e configuração das BTSs com máxima cobertura e mínima interferência, que são: (i) E-ALLOCATOR – Exact ALLOCATiOn seRvice; e (ii) M-ALLOCATOR – Metaheuristic ALLOCATiOn seRvice.

4. Publicação

Como resultado da dissertação, foram publicados os seguintes trabalhos:

- XXVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS), Qualis B4, do XXXIX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2021) [Antunes et al. 2021].
 1. O trabalho publicado no XXVI WGRS foi agraciado com o **prêmio de menção honrosa**. A codificação gerada encontra-se disponível no repositório criado para divulgação desta pesquisa¹.
- *Transactions on Network and Service Management* (TNSM), 2022, **Qualis A1, fator de impacto 5.91** [Antunes et al. 2022].
 1. O trabalho publicado no TNSM é a principal contribuição da dissertação. A codificação gerada encontra-se disponível no repositório criado para divulgação desta pesquisa².

5. Principais Resultados

Os cenários modelados para avaliação das soluções propostas foram baseados na tragédia de Brumadinho-MG. São cenários que ilustram a utilização do CCOp Mv em apoio a uma operação de resgate às vítimas do rompimento da barragem da mina Córrego do Feijão. Ocorrido em 25 de janeiro de 2019, o rompimento da barragem foi o acidente de trabalho

¹<https://github.com/eoantunes/AlocacaoDeAntenas>

²<https://github.com/eoantunes/TNSM>

mais significativo no Brasil em termos de perda de vidas humanas e o segundo maior desastre industrial do século.

A área de atuação das equipes de resgate e apoio dos veículos do CCOp Mv é apresentada na Figura 1. Os cenários têm uma extensão de 6.090 metros de comprimento (longitude) por 4.872 metros de largura (latitude), o que equivale a uma área de cerca de 30 km^2 . É delimitado pelos pontos de coordenadas $(-20.115437, -44.16269)$, $(-20.159446, -44.16269)$, $(-20.159446, -44.10444)$, $(-20.115437, -44.10444)$ e subdividido em setores. Os setores são identificados em linhas i e colunas j . Onde $i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$ e $j \in \{1, 2, 3, \dots, J\}$, onde I é o cardinal de conjunto que divide longitudinalmente e J é o cardinal do conjunto que divide o cenário latitudinalmente.

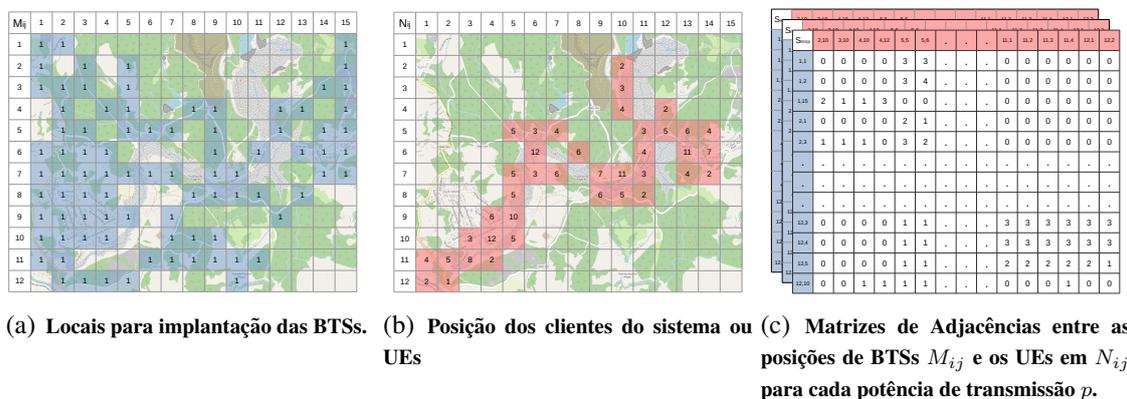


Figura 1. Cenário modelado com base na tragédia de Brumadinho-MG.

O desempenho das soluções de otimização propostas E-ALLOCATOR e M-ALLOCATOR, foram comparadas com uma heurística de alocação para investigar o problema de otimização. Esta heurística define as posições das BTSs e utiliza a potência média de transmissão entre as disponíveis na avaliação. É válido salientar que a heurística não determina a quantidade de BTSs a ser implantada. Portanto essa quantidade foi herdada da solução E-ALLOCATOR para uma comparação mais justa. Os cenários e o consenso de cobertura agruparam os resultados apenas para fins de comparação. Devido a isso, no eixo horizontal de todos os gráficos, são exibidos os consensos de cobertura discretizados nos valores de 80%, 90%, 95%, 98% e 100%. Foram conduzidos 30 experimentos para cada grupo de resultados com intervalo de confiança de 95%.

5.1. Análise dos Principais Resultados das Soluções Propostas

A Figura 2 apresenta o número de BTSs resultante do processo de otimização das soluções E-ALLOCATOR e M-ALLOCATOR. Os resultados da heurística do problema não são exibidos porque foram herdados dos resultados obtidos pelo E-ALLOCATOR. Fica evidente que o M-ALLOCATOR é mais econômico ao empregar um número menor de veículos do CCOp Mv em todos os cenários e consensos de cobertura, exceto para o caso do cenário Brum1215 no consenso de cobertura de 100% em que o E-ALLOCATOR sempre emprega quatro veículos enquanto a solução meta-heurística tem uma média ligeiramente superior. No entanto, a análise de economia de recursos não deve ocorrer isoladamente. Deve-se levar em consideração a potência total de transmissão gasta em cada caso, apresentada na Figura 3. Estes resultados (Figura 3) confirmam o resultado

anterior (Figura 2) ao demonstrar que, na maioria dos casos, o M-ALLOCATOR supera tanto a solução heurística quanto a exata por apresentar os menores valores relativos.

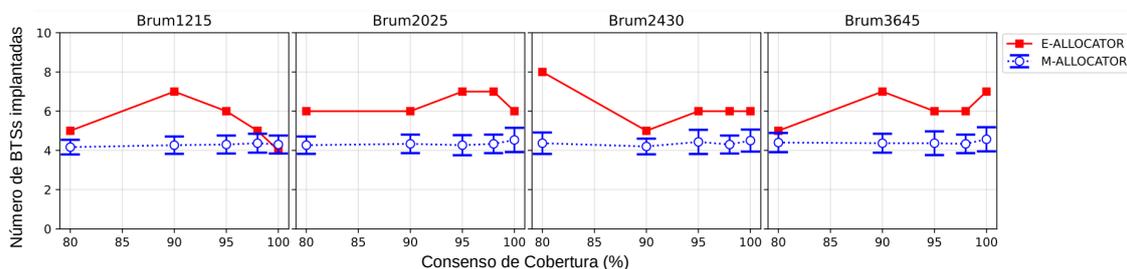


Figura 2. Número de BTSs (veículos do CCOp Mv) implantados.

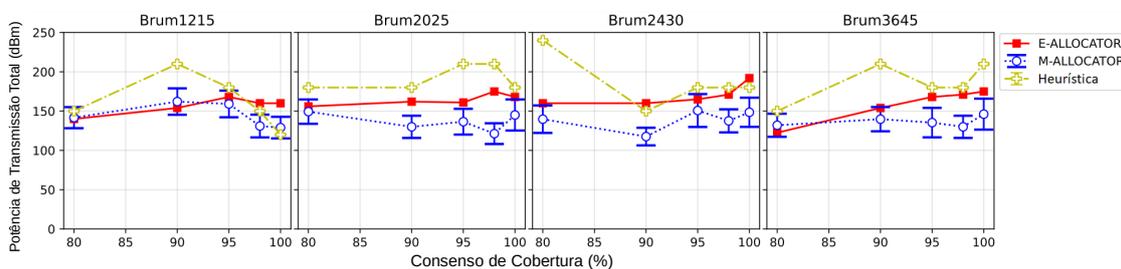


Figura 3. Energia despendida com a Potência de Transmissão Total.

Em termos de qualidade das soluções, a Figura 4 apresenta o comportamento das soluções em relação aos dois objetivos de otimização. Ao correlacionar o consenso de cobertura (no eixo horizontal), que expressa a maximização da cobertura para UEs, com a interferência causada pela sobreposição dos sinais das BTSs implantadas (no eixo vertical), observamos o ótimo de Pareto nos resultados da solução E-ALLOCATOR. Isso se deve à solução exata que cobre todo o espaço de pesquisa e garante resultados ótimos. Devido a isso, o E-ALLOCATOR tem o menor grau de sobreposição de valores. Essa análise também destaca que, embora o M-ALLOCATOR não garanta soluções ótimas de Pareto, ele entrega resultados muito próximos aos obtidos pela solução exata. Tendo obtido valores de DPR consolidados para todos os cenários e consenso de cobertura com médias de 26,22% e desvio padrão de 9,29% e sendo praticamente constantes, conforme Figura 5. Dessa forma, fica comprovada a superioridade da qualidade dos resultados obtidos pelas duas soluções propostas sobre a heurística.

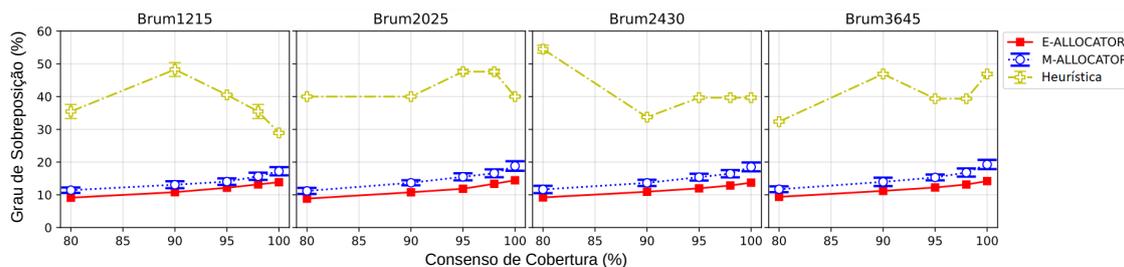


Figura 4. Grau de Sobreposição representando a interferência da sobreposição dos sinais das BTSs implantadas sobre os setores de UEs N_{ij} .

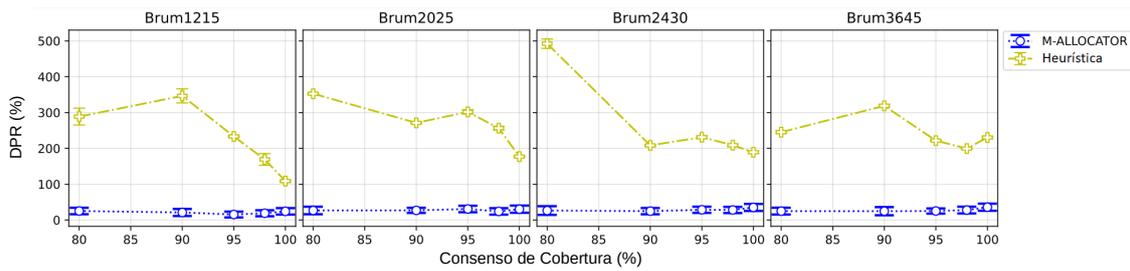


Figura 5. Desvio Percentual Relativo (DPR) do ótimo de Pareto obtido pela solução E-ALLOCATOR.

Inicialmente, podemos pensar que as melhores soluções entregariam uma área de cobertura maior em km^2 . No entanto, conforme apresentado na Figura 6, a área coberta é, em praticamente todos os casos, maior nos resultados da heurística, seguida pelos resultados do M-ALLOCATOR e, por fim, pelos resultados do E-ALOCADOR. O que ocorre na verdade é que os resultados expressos na Figura 6 demonstram exatamente o sinal desperdiçado fornecido pelas soluções M-ALLOCATOR e pelas heurísticas. Isso porque o que determina a qualidade do serviço para os UEs do sistema é o valor do consenso de cobertura. Ele atua como uma restrição de otimização, garantindo um número mínimo de clientes do sistema atendidos pelo E-ALLOCATOR e M-ALLOCATOR. Do exposto, pode-se concluir que o E-ALLOCATOR é mais seletivo nas escolhas de posições de implantação, quantidade e configurações das BTSs do CCOp Mv. Ela é seguida pela solução M-ALLOCATOR, e ambas se mostram superiores, em termos de seletividade, em comparação aos resultados alcançados pela heurística.

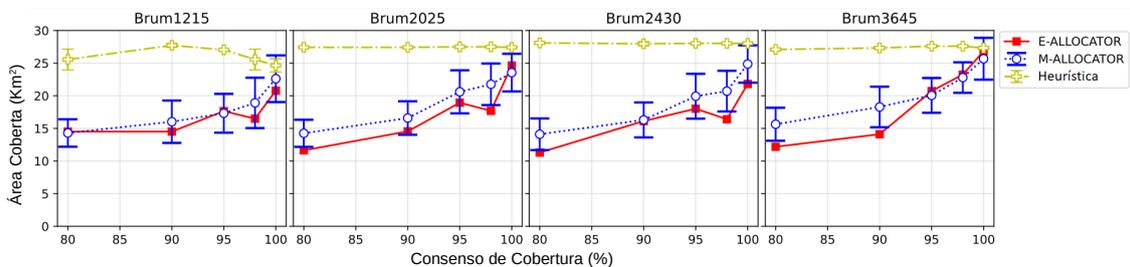


Figura 6. Área Coberta expressa pela soma das áreas dos setores cobertos por pelo menos uma BTS.

A superioridade dos resultados alcançados pelas soluções propostas, em termos de qualidade e de economia de recursos, foi comprovada; no entanto, está associada a um custo de processamento muito superior ao da heurística, o que se reflete diretamente no tempo de processamento de cada uma das soluções propostas. A Figure 7 revela que o E-ALLOCATOR é a mais sensível ao aumento da carga de trabalho, pois apresenta um aumento exponencial (ressalta-se que a escala de tempo apresentada é logarítmica). Isso se deve à complexidade das soluções baseadas no algoritmo BB ser da ordem de $O(n^2)$ conforme demonstrado em [Rust 1983]. Já o M-ALLOCATOR apresentou um aumento linear. Este comportamento é entendido uma vez que esta solução avalia a qualidade de suas soluções de forma estocástica e mantém fixo o número de gerações que irá analisar. O tempo de processamento aumenta em M-ALLOCATOR em cada cenário devido à crescente complexidade das avaliações das soluções o que justifica a linearidade do aumento

de tempo de processamento. Devido a um número mais significativo de nós no grafo do sistema, o número de comparações para obter o grau de adaptação de cada solução (ou seja, o peso das arestas resultantes das associações entre BTSs e UEs) avaliada é proporcionalmente maior. A heurística praticamente não sofre com o aumento da carga de trabalho e continua a fornecer resultados instantaneamente. O comportamento heurístico é justificado pela baixa carga de processamento que realiza, pois não avalia as matrizes de pesos e de conectividade para decidir onde implantar as BTSs.

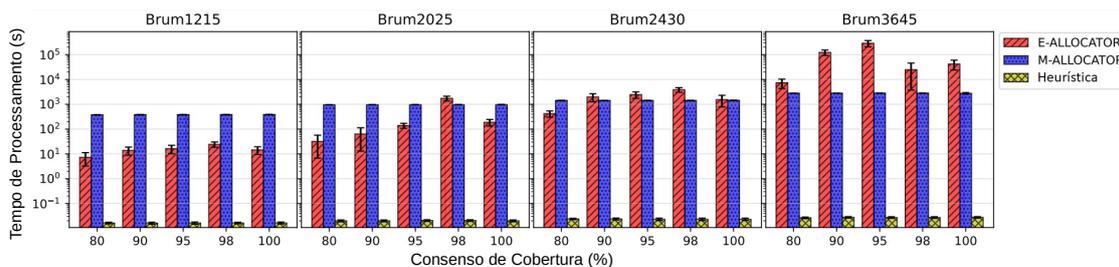


Figura 7. Impacto do consenso de cobertura e das dimensões dos cenários sobre o tempo de processamento.

Por fim, vale ressaltar que o E-ALLOCATOR demonstrou ser adequado para cenários com baixa carga de trabalho, enquanto o M-ALLOCATOR, adequado para cenários com altas cargas de trabalho. Além desse aspecto, o mecanismo de otimização M-ALLOCATOR demonstrou fornecer soluções quase ótimas (com pouco DPR em relação ao ótimo de Pareto) dentro do tempo computacional adequado para todas as instâncias do problema.

6. Considerações Finais

Este resumo estendido apresenta as principais contribuições da dissertação, que explorou o problema de localização de cobertura máxima com mínima interferência do CCOp Mv para apoiar o comando operacional do Exército Brasileiro. Diante desse problema, esta pesquisa investigou as questões de emprego do CCOp Mv e que tem impacto direto na eficiência espectral da rede de acesso rádio do sistema 4G/LTE do CCOp Mv. Por isso, as principais questões exploradas foram: (i) Qual o número de BTSs utilizar para uma determinada demanda de emprego?; (ii) Qual a localização destes veículos?; (iii) Quais critérios utilizar para a definição das posições das BTSs?; e (iv) Quais os parâmetros devem ser configurados em cada BTS?

Para tanto, a dissertação propôs um modelo analítico baseado em PLIM, que foi utilizado para modelar duas soluções otimizadas: (i) E-ALLOCATOR; e (ii) M-ALLOCADOR. Além de cobrir o maior número de pontos de demanda com o menor número de nós e potências de transmissão ajustadas, ambas as soluções visam reduzir as interferências decorrentes da sobreposição de sinais das BTSs. O objetivo é fornecer a melhor cobertura possível ao empregar o CCOp Mv em operações que exigem comunicação crítica com maior qualidade e economia de recursos. Os resultados demonstraram que o E-ALLOCATOR é adequado para uma baixa carga de trabalho, enquanto o M-ALLOCATOR é mais adequado para cenários com alta carga de trabalho. Ambas as soluções propostas são superiores à heurística apresentada, pois superam-na em termos de qualidade, confiabilidade e economia de recursos. Além disso, os resultados demonstram

que o tempo de computação do E-ALLOCATOR aumenta significativamente com o tamanho do problema. Ao mesmo tempo, M-ALLOCATOR fornece soluções quase ótimas dentro do tempo computacional adequado para todas as instâncias.

Referências

- Alizadeh, R., Nishi, T., Bagherinejad, J., and Bashiri, M. (2021). Multi-period maximal covering location problem with capacitated facilities and modules for natural disaster relief services. *Applied Sciences*, 11(1):397.
- Antunes, E. d. O., Caetano, M. F., Marotta, M. A., Araujo, A., Bondan, L., Meneguette, R. I., and Filho, G. P. R. (2022). Optimized solutions for deploying a militarized 4g/lte network with maximum coverage and minimum interference. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, pages 1–12.
- Antunes, E. d. O., Caetano, M. F., Marotta, M. A., Araujo, A., Bondan, L., Meneguette, R. I., and Rocha Filho, G. P. (2021). Soluções otimizadas para o problema de localização de máxima cobertura em redes militarizadas 4g/lte. In *Anais do XXVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços*, pages 152–165. SBC.
- Atta, S., Mahapatra, P. R. S., and Mukhopadhyay, A. (2018). Solving maximal covering location problem using genetic algorithm with local refinement. *Soft Computing*, 22(12):3891–3906.
- Church, R. and ReVelle, C. (1974). The maximal covering location problem. In *Papers of the regional science association*, volume 32, pages 101–118. Springer-Verlag.
- Costa, V. O. (2016). Alocação de antenas para rede celular de 4g utilizando algoritmos meméticos. *Dissertação de Mestrado*.
- Gazani, M. and Niaki, S. (2021). The capacitated maximal covering location problem with heterogeneous facilities and vehicles and different setup costs: An effective heuristic approach. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 12(1):79–90.
- Grochla, K. and Slabicki, M. (2019). Transmit power optimisation in cellular networks with nomadic base stations. *IET Communications*, 13(18):3068–3074.
- Kumar, S., Jangir, P., Tejani, G. G., Premkumar, M., and Alhelou, H. H. (2021). Mopgo: A new physics-based multi-objective plasma generation optimizer for solving structural optimization problems. *IEEE Access*, 9:84982–85016.
- Mathar, R. and Niessen, T. (2000). Optimum positioning of base stations for cellular radio networks. *Wireless Networks*, 6(6):421–428.
- Mehboob, U., Qadir, J., Ali, S., and Vasilakos, A. (2016). Genetic algorithms in wireless networking: techniques, applications, and issues. *Soft Computing*, 20(6):2467–2501.
- Rust, R. (1983). *Um Algoritmo Branch and Bound para resolução de problemas de localização capacitados*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Vallejo-Mora, A. B., Toril, M., Luna-Ramírez, S., Rigueira, M., and Pedraza, S. (2018). Analytical model for estimating the impact of changing the nominal power parameter in lte. *Mobile Information Systems*, 2018.
- Yang, P., Xiao, Y., Zhang, Y., Zhou, S., Yang, J., and Xu, Y. (2020). The continuous maximal covering location problem in large-scale natural disaster rescue scenes. *Computers & Industrial Engineering*, 146:106608.