



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

**Serviço de Apoio à Decisão para o Problema de
Localização de Máxima Cobertura em Redes
Militarizadas 4G/LTE**

Emerson O. Antunes

Dissertação apresentada como requisito parcial para qualificação do
Mestrado Profissional em Computação Aplicada

Orientador
Prof. Dr. Geraldo Pereira Rocha Filho

Brasília
2021



Universidade de Brasília

Instituto de Ciências Exatas
Departamento de Ciência da Computação

Serviço de Apoio à Decisão para o Problema de Localização de Máxima Cobertura em Redes Militarizadas 4G/LTE

Emerson O. Antunes

Dissertação apresentada como requisito parcial para qualificação do
Mestrado Profissional em Computação Aplicada

Prof. Dr. Geraldo Pereira Rocha Filho (Orientador)
Presidente

Prof. Dr. Marcos Fagundes Caetano Prof. Dr. José Rodrigues Torres Neto
Membro Interno Membro Externo

Prof. Dr. Edison Ishikawa
Suplente

Prof. Dr. Marcelo Ladeira
Coordenador do Programa de Pós-graduação em Computação Aplicada

Brasília, 24 de setembro de 2021

Resumo

A definição da localização geográfica das estações transceptoras base de um sistema de telefonia é fundamental para o desempenho deste tipo de sistema. Devido a esta importância e à complexidade associada a esta tarefa é que justificam-se os esforços para a criação de serviços de apoio à decisão para sua automação. Neste sentido este trabalho propõe resolver o problema de localização de máxima cobertura do Centro de Coordenação de Operações Móvel (CCOp Mv) que visa apoiar o comando operacional do Exército Brasileiro. Este problema consiste em selecionar, em uma região limitada e com infraestrutura precária de comunicação na área de operação das tropas terrestres, as posições dos veículos equipados com eNodeBs do sistema de telefonia 4G/LTE para (*i*) maximizar sua área de cobertura, (*ii*) empregando o menor número de veículos para poupar recursos e (*iii*) reduzindo a interferência entre células. Trata-se de uma proposta de otimização multi-objetivo. Para alcançar estes objetivos, é proposta uma modelagem analítica baseada em Problemas Lineares Inteiros Mistos que fundamenta duas soluções de otimização: (*i*) E-ALLOCATOR – Exact ALLOCATiOn seRvice; e (*ii*) M-ALLOCATOR – Metaheuristic ALLOCATiOn seRvice. As soluções serão avaliadas em cenários que empregam o uso do CCOp Mv em apoio à uma operação de resgate com base na tragédia ocorrida em janeiro de 2019 em Brumadinho-MG. Os resultados preliminares obtidos até o momento mostram que o E-ALLOCATOR é adequado quando há baixa carga de trabalho, enquanto o M-ALLOCATOR é adequado para os cenários com alta carga de trabalho. Além disso, os resultados indicam que o M-ALLOCATOR fornece soluções subótimas dentro de um tempo computacional adequado para todas as instâncias do problema.

Palavras-chave: otimização, MCLP, localização de estações transceptoras base, cobertura 4G/LTE

Abstract

The definition of the geographic location of the base transceiver stations of a telephone system is fundamental for the performance of this type of system. Due to this importance and the complexity associated with this task, efforts to create decision support services for its automation are justified. In this sense, this work proposes to solve the problem of locating maximum coverage of the Mobile Operations Coordination Center (CCOp Mv) which aims to support the operational command of the Brazilian Army. This problem consists of selecting, in a limited region and with poor communication infrastructure in the area of operation of ground troops, the positions of vehicles equipped with eNodeBs of the 4G/LTE telephone system to (*i*) maximize their coverage area, (*ii*) employing the smallest number of vehicles to save resources and (*iii*) reducing interference between cells. It is a multi-objective optimization proposal. To achieve these goals, an analytical model based on Mixed Integer Linear Problems is proposed, which supports two optimization solutions: (*i*) E-ALLOCATOR – Exact ALLOCATiOn seRvice; and (*ii*) M-ALLOCATOR – Metaheuristic ALLOCATiOn seRvice. The solutions will be evaluated in scenarios that employ the use of CCOp Mv in support of a rescue operation based on the tragedy that occurred in January 2019 in Brumadinho-MG. Preliminary results obtained so far show that E-ALLOCATOR is suitable when there is low workload, while M-ALLOCATOR is suitable for high workload scenarios. Furthermore, the results indicate that M-ALLOCATOR provides suboptimal solutions within an adequate computational time for all instances of the problem.

Keywords: optimization, MCLP, location of base transceivers stations, 4G/LTE coverage

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contextualização e Problema	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Estrutura do Documento	3
2	Fundamentação Teórica	4
2.1	Pesquisa Operacional e a Programação Linear	4
2.2	Métodos de Otimização Discretos	7
2.2.1	Exatos	7
2.2.2	Aproximados	7
2.2.3	Heurísticos e Meta-Heurísticos	8
2.3	Sistema de telefonia 4G/LTE	9
2.4	Considerações Finais	14
3	Trabalhos Relacionados	15
3.1	Discussão dos Trabalhos Relacionados	17
4	Projeto de Pesquisa	19
4.1	Projeto: Serviço de Apoio à Decisão do CCOp Mv	19
4.1.1	Modelagem dos Cenários	21
4.1.2	Modelo do Serviço	25
4.1.3	Definição do Problema	27
4.1.4	Soluções Otimizadas	28
4.1.5	Métricas e <i>Baseline</i> Propostos	32
4.2	Plano de Trabalho e Cronograma	33
5	Resultados Preliminares	36
5.1	Configuração dos Experimentos	36
5.2	Métricas Avaliadas	37
5.3	Resultados Obtidos	38

5.4 Considerações Finais	39
5.5 Produção Científica e Atual Contribuição	40
Referências	42

Lista de Figuras

2.1 Arcabouço da Pesquisa Operacional. (Fonte: SoBraPO [1])	5
2.2 Arquitetura de um sistema 4G/LTE.	12
4.1 Cenário de funcionamento do serviço de apoio à decisão do CCOP Mv.	20
4.2 Etapas do serviço proposto.	20
4.3 Mapa setorizado por quadrículas geográficas - cenário Brum1215.	22
4.4 Matriz que delimita as quadrículas aptas à implantação dos eNodeBs no cenário Brum1215.	23
4.5 Matriz que clusteriza os clientes do sistema LTE no cenário Brum1215.	23
4.6 Cenário Smnp.	24
4.7 Arquitetura.	24
5.1 Cenário inicial modelado baseado na tragédia de Brumadinho-MG.	37
5.2 Impacto de desempenho com a variação dos métodos de seleção.	38
5.3 Impacto de desempenho com a variação dos métodos de reprodução.	39
5.4 Impacto de desempenho com a variação dos métodos de mutação.	39

Lista de Tabelas

1.1 Constituição do Centro de Coordenação de Operações Móvel.	1
3.1 Comparação com os trabalhos relacionados.	18
4.1 Notações usadas na modelagem e definição do problema.	26
4.2 Hiperparâmetros otimizados.	32
4.3 Cronograma de atividades que compõem o projeto de pesquisa, o símbolo ✓ representa as atividades finalizadas e o símbolo ○, as atividades a desenvolver.	35
5.1 Parâmetros utilizados no cenário modelado.	37
5.2 Desempenho das soluções otimizadas (Média ± IC de 95%).	40

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização e Problema

O Centro de Coordenação de Operações Móvel (CCOP Mv) é um projeto do Exército Brasileiro que integra o Programa Proteger¹. Seu objetivo é suprir a Força Terrestre da infraestrutura de Tecnologia de Informação e Comunicações (TIC) necessária ao apoio das operações em ambientes desprovidos de infraestrutura de comunicações. Conforme apresentado na Tabela 1.1, CCOP Mv é composto por treze veículos, sendo eles: (i) oito que são os Nós de Acesso do CCOP Mv; e (ii) cinco que formam o Conjunto de Coordenação das operações do CCOP Mv.

Tabela 1.1: Constituição do Centro de Coordenação de Operações Móvel.

Veículo	Qnt	Tipo	Peso (Ton)
	8	Nó de Acesso	2,5
	5	Conjunto de Coordenação	5

Todos estes veículos disponibilizam uma plataforma de comunicação formada pelas seguintes tecnologias:

- Sistema de telefonia militarizado 4G/LTE (*4th Generation/Long Term Evolution*);
- Pontos de acesso Wi-Fi;
- Rádios HF, VHF e UHF;
- Sistema Rádio Digital Troncalizado (SRDT);

¹<http://www.epex.eb.mil.br/index.php/proteger>

- Equipamentos com acesso ao Sistema Militar de Comunicações por Satélite e
- Sistemas de Comando e Controle de Consciência Situacional e Apoio à Decisão.

Dentre as tecnologias supracitadas, o sistema de telefonia 4G/LTE será investigado nesta pesquisa.

Entre os elementos que integram a arquitetura de um sistema de telefonia LTE e são os equipamentos transportados pelas viaturas do CCOp Mv, estão as estações transceptoras base (eNodeB, termo definido pelas especificações do *3 Generation Partnership Project* (3GPP)² para as estações transceptoras base do sistema de telefonia de 4^a geração e que é o acrônimo para *Node B* evoluído, do inglês *evolved Node B*), conforme ilustrado na Figura 2.2. Juntamente com os equipamentos dos usuários (UEs, do inglês *User Equipment*) elas compõem a interface *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) do sistema LTE proposto pelo 3GPP.

A localização geográfica das eNodeB (eNodeB) são fundamentais para o desempenho da rede LTE e constitui uma das etapas mais importantes do processo de planejamento das redes de rádio celulares [2]. Tal processo envolve três etapas, sendo elas: (*i*) o uso de modelos de predição de propagação; (*ii*) descrição analítica do tráfego demandado pelo serviço; e (*iii*) localização e configurações das eNodeB. A predição de propagação calcula a potência do sinal recebido baseada em modelos teóricos e/ou empíricos de medições de energia do espectro de Rádio Frequência (RF) [3]. Por outro lado, a descrição analítica do tráfego demandado por um serviço determina a carga de trabalho a ser suportada pelo sistema de comunicação, definindo requisitos de desempenho, tais como latência máxima, banda mínima entre outros. Por fim, a localização das eNodeB define o posicionamento geográfico levando em consideração a instalação de todos os elementos necessários, tais como mastros, antenas e o próprio eNodeB.

Devido à complexidade do processo de definição das localizações geográficas das estações transceptoras base de um sistema de telefonia, diversos trabalhos propuseram Sistemas de Apoio a Decisão (SAD), como forma de automatizar esta tarefa. É importante destacar que não é uma tarefa trivial definir o melhor posicionamento geográfico no terreno dessas viaturas, de forma a permitir uma cobertura adequada para a realização de operações militares que necessitam de comunicação 4G/LTE. Esta tarefa enquadra-se no planejamento do melhor posicionamento das eNodeB e, em específico, é tratada como uma derivação do problema de localização de máxima cobertura (MCLP, do inglês *Maximal Covering Location Problem*) [4]. O MCLP é um problema NP-Completo cujo objetivo visa a criação de uma área de cobertura para atender o maior número de pontos de demanda.

²<https://www.3gpp.org/>

Diferentes SADs foram propostos para lidar com o problema do MCLP. Na maior parte desses estudos [5, 6, 7, 8], as soluções propostas sugerem melhorias para lidar com MCLP de maneira genérica, *i.e.*, apesar de existir abordagens que exploram aplicações do MCLP para domínio específico, como posicionamento de garagens de veículos [9], alocação de antenas [10] ou até mesmo veículos de comunicação [11] aplicados em operações de resgate, tais abordagens tratam apenas de um subconjunto do problema, não refletindo a modelagem para cenários reais. A modelagem de [10] é simplificada e seus resultados são avaliados apenas em termos de velocidade. As abordagens de [10] e [11] não exploram os ajustes dos hiperparâmetros dos algoritmos meta-heurísticos empregados. Como citado em [12] e ratificado por [13], os modelos desenvolvidos estão longe dos problemas do mundo real, indicando um campo de pesquisa promissor que este trabalho irá investigar. Desta forma, as soluções apresentadas neste trabalho para o problema de posicionamento das eNodeB do CCOp Mv, vão além da questão científica na resolução do problema, passando pela sua aplicação prática no escopo do CCOp Mv.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta Dissertação é propor, desenvolver e avaliar soluções para resolver o problema de localização dos veículos de comunicação do CCOp Mv. Para alcançar tal objetivo, serão estudados os mecanismos de otimização, as técnicas de modelagem analítica de problemas de otimização, as soluções exatas, heurísticas e metaherísticas, além de técnicas para modelagem de cenários e de avaliação das soluções propostas.

1.3 Estrutura do Documento

O restante deste documento está organizado da seguinte maneira. No Capítulo 2 é feita uma fundamentação teórica, visando oferecer a base necessária para a compreensão do assunto abordado e seus desafios. No Capítulo 3 cito trabalhos similares ou que influenciaram de alguma forma esta proposta de dissertação. Enquanto no Capítulo 4 apresento a metodologia proposta para este projeto de pesquisa, com a formulação dos experimentos a serem realizados e métodos de avaliação. Finalmente, no Capítulo 5 apresento os resultados parciais destacando as principais contribuições obtidas até o momento, bem como as considerações finais.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, é apresentada a fundamentação teórica com a finalidade de fornecer subsídios à compreensão dos próximos capítulos. Inicialmente, é apresentado um embasamento teórico sobre Pesquisa Operacional, a técnica de Programação Linear e suas aplicações. Subsequentemente, é realizado um estudo dos métodos de otimização discretos. Finalmente, são apresentados e discutidos os conceitos da tecnologia de 4^a geração de telefonia móvel para o entendimento da solução proposta nesta Dissertação.

2.1 Pesquisa Operacional e a Programação Linear

Segundo definição da Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional (SoBraPO) [1], Pesquisa Operacional (PO) é a área de conhecimento que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos avançados para auxiliar na tomada de melhores decisões nas mais diversas áreas de atuação humana. Neste contexto, conforme visualizado na Figura 2.1 é através do uso de técnicas de modelagem matemática e eficientes algoritmos computacionais, a PO pode auxiliar o decisor na análise dos mais variados aspectos e situações de um problema complexo, permitindo a tomada de decisões efetivas e a construção de sistemas mais eficientes e produtivos. Ainda segundo a SoBraPO [1], o aumento da capacidade de processamento computacional e a possibilidade de lidar com problemas cada vez maiores, tem impulsionado o desenvolvimento de novos métodos analíticos que estão em constante evolução e propiciam uma vasta gama de aplicações.

Métodos envolvendo programação matemática (entre elas a Programação Linear), simulação, teoria dos jogos, teoria das filas, análise de redes, teoria de decisão, aprendizado de máquina e ciência dos dados são reconhecidos por sua poderosa capacidade de apresentar soluções efetivas para problemas aplicados.

De acordo com Barbosa [14], a PO é uma ciência aplicada que oferece mecanismos para:



Figura 2.1: Arcabouço da Pesquisa Operacional.
 (Fonte: SoBraPO [1])

- resolver problemas reais;
- tomar decisões com base em dados e correlações quantitativos;
- criar, planejar e operar sistemas por meio de tecnologias e métodos de diversas áreas de conhecimento (PO é interdisciplinar);
- diminuir os custos e maximizar o lucro;
- encontrar a solução ótima.

Entre as aplicações da PO, Lachtermacher [15] relaciona uma série de situações/problemas em que ela pode auxiliar no processo de tomada de decisão:

- otimização de recursos;
- localização;
- roteirização;
- carteiras de investimento;
- alocação de pessoas;
- previsão de planejamento;
- entre outros.

Ainda de acordo com Lachtermacher [15], entre as diversas técnicas estudadas pelo ramo de Pesquisa Operacional a técnica que se destaca para a resolução dos problemas associados à alocação de recursos é a técnica de Programação Linear (PL).

Segundo Taha [16] a PL foi desenvolvida conceitualmente após a Segunda Guerra Mundial, pelo soviético Kolmogorov, com o objetivo de resolver problemas de logística militares. Entretanto, o grande marco dos estudos de PL ocorreu em 1947, com o desenvolvimento do método de resolução de problemas de PL denominado "método simplex". Ele foi proposto pelo matemático Dantzig. Mais recentemente em 1984, Karmakar desenvolveu um algoritmo que se tem mostrado superior ao simplex na resolução de problemas de PL extremamente grandes. Contudo, ainda segundo Taha [16], o método simplex continua sendo o mais utilizado nos dias de hoje e é a base de *solvers* de planilhas eletrônicas. Andrade [17] explica que o Método Simplex percorre os vértices da região viável até encontrar uma solução que não possua soluções vizinhas melhores que ela, tendo assim a solução ótima. Em alguns casos a solução ótima não pode ser encontrada, devido à falta de solução viável para o problema ou então quando uma ou mais variáveis tendem ao infinito, fazendo com que as restrições continuem sendo satisfeitas, o que fornece um valor sem limites para a função objetivo.

Segundo Barbosa [14], PL é uma técnica de otimização aplicada em sistemas de equações e inequações lineares representativos de modelos matemáticos que descrevem o problema sob análise. Estes modelos são constituídos de variáveis de decisão, funções objetivo e equações que modelam as restrições, estes dois últimos expressos por equações ou inequações lineares. Consiste, portanto, em uma técnica de otimização fundamentada no contexto matemático de equações ou inequações lineares que modelam o problema em estudo a ter sua solução ótima descoberta.

Esses problemas de otimização podem ser divididos em três categorias: aqueles cujas variáveis assumem valores reais (ou contínuos), aqueles cujas variáveis assumem valores discretos (ou inteiros) e aqueles em que há variáveis inteiras e contínuas, classificados, respectivamente, como problemas de Otimização Contínua, Otimização Combinatória ou Discreta, e Otimização Mista. Da mesma forma e na mesma ordem as técnicas que solucionam estes problemas são a Programação Linear (PL), a Programação Linear Inteira (PLI) e a Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Focaremos nesta pesquisa na classe de problemas de Otimização Mista, tratadas e resolvidas pelas técnicas de PLIM.

Arenales *et al.* [18] afirmam que problemas de programação inteira e mista são resolvidos:

- por métodos exatos, que fornecem uma solução ótima; ou
- por algoritmos aproximados, que garantem a distância máxima entre o valor da solução subótima encontrada e o valor ótimo; ou
- por métodos heurísticos ou meta-heurísticos, que, em geral, fornecem uma solução subótima, sem conhecimento da qualidade desta em relação a uma solução ótima.

Para esta pesquisa pretende-se realizar a modelagem do problema de alocação das eNodeBs do sistema de telefonia 4G/LTE do CCOp Mv baseadas na técnica de modelagem PLIM e nos mecanismos de otimização discretos apresentados na seção seguinte.

2.2 Métodos de Otimização Discretos

Os métodos de otimização são os algoritmos ou as implementações computacionais que resolvem os problemas previamente modelados. Eles podem ser divididos em métodos exatos, aproximados e heréticos / meta-heurísticos conforme explorados a seguir.

2.2.1 Exatos

Uma forma de obter uma solução ótima para um problema é utilizar um processo exaustivo, enumerando todas as soluções viáveis de acordo com as restrições do modelo de modo que o valor de todas as soluções factíveis é calculado, e escolhe-se a de maior valor (em problemas de maximização) ou a de menor valor (em problemas de minimização).

Explorar todas as soluções viáveis pode ser muito custoso ou até inviável a depender do tamanho do problema a ser estudado. É por isso que muitas pesquisas para descobrir mecanismos de redução deste custo foram empreendidas e de acordo com Barbosa *et al.* [14] uma forma de reduzir o espaço de busca consiste em usar informação do problema de programação linear para executar um procedimento denominado enumeração implícita, em que subconjuntos de soluções são implicitamente considerados e descartados, pois não contêm uma solução ótima, ou contêm soluções ótimas distintas, mas de mesmo valor. Estes subconjuntos são obtidos pela estratégia dividir para conquistar, que separa o problema original em problemas menores que requerem menor esforço computacional para serem resolvidos. Esta estratégia é usada nos métodos *branch-and-bound* (B&B), plano de corte e *branch-and-cut* (B&C). Muito provavelmente é devido a estas estratégias de redução da complexidade computacional destes mecanismos que Arenales *et al.* [18] afirmam que os métodos exatos mais empregados para resolver problemas genéricos de PLIM são baseados nos enfoques B&B e planos de corte e na combinação destes, o método B&C.

2.2.2 Aproximados

Algoritmos de aproximação são mecanismos que geram soluções com diferença pré-determinada entre os valores de uma solução subótima e de uma solução ótima. A ideia por trás desta classe de algoritmos é que para reduzir a complexidade da busca pelas soluções, abre-

se mão da otimalidade destas soluções, mas garante-se o quanto distante estas soluções subótimas estarão da solução ótima.

Entre os algoritmos desta classe cita-se o algoritmo *a priori*, que estabelece a distância entre o valor de todas as instâncias factíveis e o valor ótimo. Existe também o algoritmo aproximado *a fortiori* em que a distância é dada pelo valor da solução de cada instância. Neste caso, o valor da solução subótima está mais próximo do valor ótimo do que o valor fornecido por um algoritmo do tipo *a priori*.

Ressalta-se dois aspectos em um algoritmo de aproximação: (*i*) a existência de um algoritmo em tempo polinomial para problemas NP-difíceis e (*ii*) no caso de um algoritmo de aproximação *a priori*, o requisito de produzir uma solução subótima para todas as instâncias.

2.2.3 Heurísticos e Meta-Heurísticos

Heurísticos

O termo Heurística deriva da palavra grega *Heuriskein* que significa descobrir. Esse termo é usado para descrever um método que, baseado na experiência ou julgamento, parece conduzir a uma boa solução de um problema, mas que não garante produzir uma solução ótima. Também podemos considerar esse termo como associado a um conhecimento circunstancial, não verificável, nem matematicamente verificável. É comum encontrarmos a expressão “heurística gulosa”, ou “*Greedy Heuristic*”. Essa heurística resolve um problema de otimização procurando, a cada iteração, o elemento constituinte da solução que mais reduz o custo total naquele momento. A busca se encerra quando todos os elementos da solução tiverem sido calculados. A heurística gulosa apresenta a vantagem de ser rápida e, em alguns casos, produzir soluções eficientes.

Em resposta à dificuldade computacional para se obter soluções ótimas para muitos dos problemas de otimização, foram elaborados algoritmos heurísticos que buscam tirar proveito de características e informações do próprio problema. Informalmente, um algoritmo heurístico, ou simplesmente heurística, é um algoritmo que objetiva encontrar soluções viáveis “boas”, ou seja, com valor objetivo próximo a de uma solução ótima, mas sem oferecer um grau predeterminado de certeza quanto à qualidade das soluções encontradas em relação às soluções ótimas; e em tempo computacional inferior a um método exato. Os métodos heurísticos procuram um compromisso entre o desempenho na obtenção de uma solução e a qualidade da solução. A qualidade da solução pode ser medida por meio da aplicação de uma métrica que compare o valor obtido e o valor da solução ótima. Devido à complexidade dos problemas de otimização combinatória e por serem muito

sensíveis ao tamanho do problema a ser analisado, trabalha-se com métodos heurísticos para alcançar resultados aceitáveis num tempo computacional viável.

São mecanismos que tem prova de convergência, ou seja, é possível garantir que caminham em direção à solução ótima. Porém, não garantem a descoberta da solução ótima. Fundamentam-se em procedimentos que tem um enfoque intuitivo no qual a estrutura do problema possa ser interpretada e explorada de forma inteligente para obtenção de uma solução razoável. Cabe destacar que este enfoque intuitivo é a exploração das características associadas a cada problema. Por isso, pode-se dizer que os métodos heurísticos são específicos e estão intimamente relacionados à natureza do problema em estudo.

As principais técnicas heurísticas são: (i) construtivas; (ii) de Relaxação; e (iii) de Busca Local.

Meta-heurísticos

Já o termo “meta-heurística” deriva da composição de duas palavras gregas: “heurística”, já explicada anteriormente, e o prefixo “meta”, que significa “após”, indicando um nível superior de descoberta. Segundo Sørensen e Glover [19] uma metaheurística é uma estrutura algorítmica de alto nível, independente de problemas, que fornece um conjunto de diretrizes ou estratégias para desenvolver algoritmos de otimização heurísticos. Ou seja, assim como nos algoritmo heurísticos, não garantem a obtenção da solução ótima, têm prova de convergência e se fundamentam no compromisso entre desempenho e qualidade da solução subótima fornecida. A principal diferença entre os métodos heurísticos e meta-heurísticos é que nestes últimos são exploradas diretrizes gerais a todos os problemas de otimização e não como nos anteriores, as características específicas dos problemas. Portanto, uma conceituação de meta-heurística é um conjunto de conceitos que podem ser usados para definir métodos heurísticos, os quais podem ser aplicados a um conjunto amplo de diferentes problemas. Em outras palavras, uma meta-heurística pode ser vista como uma ferramenta algorítmica geral que pode ser aplicada a diferentes problemas de otimização, com modificações relativamente pequenas para torná-la adaptável a um problema específico”.

Entre suas técnicas cita-se: (i) *simulated annealing*; (ii) algoritmo genético; (iii) algoritmo memético; (iv) busca tabu; (v) GRASP; (vi) algoritmos probabilísticos.

2.3 Sistema de telefonia 4G/LTE

O padrão LTE (do inglês, *Long Term Evolution*) foi especificado pela Organização 3GPP para melhorar o desempenho das redes WCDMA/HSPA⁺ (do inglês, *Wideband Code Division Multiple Access/High Speed Packet Access Plus*), padrões de acesso ao meio

utilizados na geração anterior de rede celular, e ser a quarta geração (4G) de sistema de telefonia móvel, provendo um aumento nas taxas de transferência de dados nos sistemas de telefonia móvel celular de terceira geração (3G).

De modo geral e segundo Sverzut [20], os sistemas de telefonia celular operam no modo *full-duplex i.e.*, trabalham com dois canais: um de transmissão (Tx) e um de recepção (Rx). Cada canal é formado por uma portadora de RF e uma largura de faixa. A portadora representa a frequência alocada ao canal, enquanto a largura de faixa representa o espaço necessário para a transmissão da informação. De acordo com os requisitos operacionais do projeto CCOp Mv, a frequência portadora do sistema de telefonia 4G será de 700 MHz e a largura de faixa para transmissão das informações será de 20+20 MHz.

O 4G/LTE é um sistema de telefonia celular de rede de acesso sem fio para longa distância, além disso, é uma tecnologia de banda larga com padronização internacional podendo ser utilizada no contexto dos sistemas de comunicações de segurança pública conforme previsões do projeto CCOp Mv. Entre suas aplicações encontram-se aplicações com acesso à Internet, serviços de voz e serviços de dados. Todos fundamentados no protocolo de rede IP (do inglês, *Internet Protocol*). LTE permite dados banda larga móvel (aplicações e banco de dados), streaming de vídeo e comunicação de voz em tempo real, permitindo assim, economia de escala uma vez que a tecnologia é amplamente empregada no mundo por operadoras de celular. Os UEs podem utilizar a infraestrutura de telefonia 4G celular para enviar/receber e-mail, navegar na Web, realizar transmissão de vídeo em tempo real, realizar videoconferências, baixar arquivos, enviar streaming de vídeo enquanto se deslocam, dessa forma visualiza-se obter um alto tráfego de dados em uma infraestrutura móvel com velocidades de até 350 km/h.

Por outro lado, o 4G LTE possibilita alta taxa de uplink e downlink por setor – 7.5Mbps e 24Mbps, respectivamente, para canal de 5+5MHz – 100Mbps por site. Além disso a sua área de cobertura pode variar de 5 a 200 km² (varia com taxa de dados requerida, altura de antena e relevo) – 1 a 8 km de raio.

Dois elementos importantes, representados na Figura 2.2 na arquitetura das redes LTE podem ser descritos como sendo:

1. Sistema de Rádio Terrestre: *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN).
2. Núcleo da Rede: *Evolved Packet Core*- (EPC).

O primeiro é composto pelos nós de rede *i.e.*, as estações transceptoras base (eNodeBs), os quais são responsáveis pela comunicação com os usuários do sistema (UEs), bem como por sua comunicação com o núcleo da rede. O Núcleo da Rede tem como característica exercer

as funções de: (i) gerenciamento do Tráfego; (ii) roteamento da Comunicação e (iii) comunicação entre múltiplos protocolos, entre eles o IP e o ATM (do inglês, *Asynchronous Transfer Mode*).

Neste contexto, pode-se enumerar as seguintes características mais importantes:

- Velocidade de até 350 Mbps no DL (do inglês, *Downlink*) e de até 75 Mbps no UL (do inglês, *Uplink*) com mobilidade;
- Velocidade de 1 Gbps estacionário;
- Telefonia IP;
- Técnica de modulação OFDMA – (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing / Multiple Access*). A multiplexação por divisão de frequências ortogonais;
- Antenas tipo MIMO – Multiple Input – Multiple Output;
- Largura de banda compreendida entre 5 e 20 MHz; e
- Faixas de frequências em 700, 850, 1.800, 2.100 MHz para o Serviço Móvel Pessoal (SMP).

O padrão 4G apresentado pelo 3GPP tem inovações com relação ao 3G, o EPC é uma rede de núcleo simplificado em IP, que unifica a rede celular de voz comutada por circuitos separada e a rede celular de dados comutada por pacotes, é uma rede “toda em IP”, pois voz e dados são transportados em datagramas IP. O EPC permite que vários tipos de redes de acesso por rádio, incluindo redes de acesso 2G e 3G legadas, se conectem ao núcleo da rede. Essa característica permite uma alta escalabilidade pois a tecnologia 4G/LTE pode formar redes heterogêneas aproveitando as arquiteturas 3G, 2G e até mesmo sistemas de comunicações sem fio não padronizados pelo 3GPP como a padrão IEEE 802.11 WiFi.

A arquitetura 4G, apresentada na Figura 2.2, combina muitos componentes funcionais para garantir autenticação e controle de acesso. Todos os componentes da rede têm o mesmo protocolo IP e se comunicam entre si por meio de uma rede IP típica (por meio de interfaces lógicas). Os principais componentes dessa rede são o UE, eNodeB, HSS e o MME. Cada um desses componentes da rede possuem atribuições bem definidas conforme descrição a seguir:

- UE (do inglês, *User Equipment*): um dispositivo móvel que inclui um UICC (cartão de circuito integrado universal, um cartão SIM) integrado com o USIM (módulo de identidade do assinante universal). O USIM armazena informações relacionadas ao usuário, como o IMSI (do inglês, *International Mobile Subscriber Identity*) que é usado para identificar cada cartão SIM de uma forma única e a chave secreta

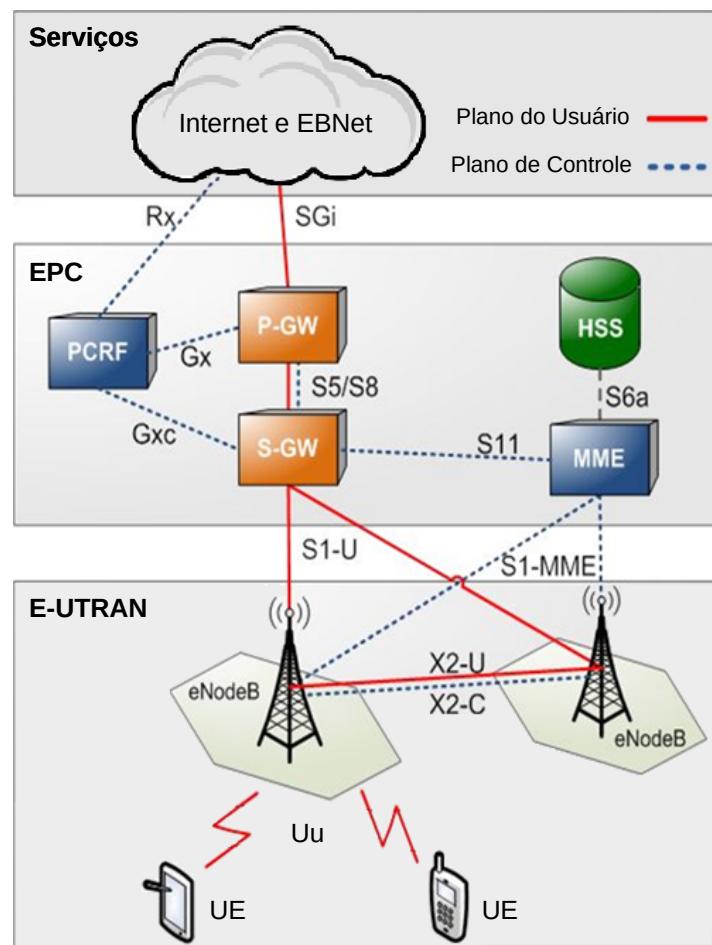


Figura 2.2: Arquitetura de um sistema 4G/LTE.

do assinante (que é pré-compartilhada com o AuC na rede doméstica e nunca deixa esses dois elementos. O IMSI identifica exclusivamente um assinante. O UE conecta o usuário a rede central do 4G LTE.

- eNodeB (Evolved Node B): Consiste em uma antena e um conjunto de transceptores, é o principal componente da E-UTRAN.
- MME (do inglês, *Mobility Management Entity*): O principal nó de controle da rede. O MME realiza a autenticação, rastreamento das localizações da UE e pela seleção dos *gateways* (decidindo os caminhos dos pacotes de dados).
- HSS (do inglês, *Home Subscriber Server*): É um servidor de dados que armazena os dados do assinante (incluindo suas identidades, direitos e perfis de assinatura) e as chaves secretas. O HSS contém o AuC (Centro de Autenticação) que contém e gera todo o material criptográfico necessário. Ele fornece dados de autenticação ao MME.
- S-GW (do inglês, *Serving Gateway*): ancora o portador de dados e roteia pacotes de dados para o UE.
- P-GW (do inglês, *Packet Data Network Gateway*): conecta à rede central do pacote às redes externas, como a Internet, e fornece endereços IP para a UE.

Aplicação do 4G/LTE no CCOP Mv O uso da tecnologia 4G/LTE no projeto CCOP Mv objetiva-se em as bases das Comunicações Críticas durante as operações militares. As Comunicações Críticas são sistemas de comunicações que se utilizam de infraestruturas, fixas ou móveis, com elevada capacidade de sobrevivência e que geram áreas de cobertura, nas quais grupo de conversação definido previamente dispõe de comunicações, de voz e dados, com possibilidade de comunicações ponto a ponto, com elevadas disponibilidade, confiabilidade e segurança, cuja principal característica é a capacidade de prover comunicação a serviços de missão crítica em prol do cidadão, usualmente chamados de Proteção Pública e Socorro a Desastres, tanto na Defesa, Segurança Pública, Defesa Civil e Fiscalização, Repressão e Controle. Para as Forças Armadas, tem como características operar em locais isolados, fronteiras com Área Rural, longe de centros urbanos onde é comercialmente inviável a cobertura de operadoras comerciais. Os principais serviços requeridos para a aplicação 4G/LTE para esses órgãos são os seguintes: (*i*) aplicativos de comando e controle com comunicação IP: eles permitem que grandes números de serviços sejam fornecidos, como, por exemplo, streaming de vídeo e comunicação de voz (PTT e VoIP) em tempo real; (*ii*) mobilidade em operações táticas: podem ser utilizadas plataformas móveis veiculares como apoio táticos, com possibilidade de prover temporariamente cobertura em uma determinada região que necessite de comunicação crítica fornecendo

aplicações de voz em grupo, videoconferência, vídeo em tempo real, utilização de aplicativos de comando e controle; (*iii*) atuação em locais isolados: gerenciamento centralizado de desempenho de missão crítica e indicadores de disponibilidade otimizados modelos de chamadas através de redes de rádio; (*iv*) gerenciamento de operações: gerenciamento centralizado de performance de missão crítica e indicadores de disponibilidade otimizados para modelos de chamadas de missão crítica e utilização através de redes de rádio, LTE, aplicações e dispositivos – modelo de multi-agência; (*v*) priorização e controle em tempo real: o núcleo do LTE missão crítica irá gerenciar priorização, controle e garantia de serviço de nível missão crítica que não pode ser satisfeita com sistemas de nível comercial para operadoras.

2.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram abordados os principais conceitos para fornecer subsídios a esta Dissertação. Em razão disso, foi dado uma maior ênfase na técnica de Programação Linear, bem como nos métodos de otimização discretos que estão diretamente relacionados com esta pesquisa. A partir dos conceitos apresentados, os principais desafios a serem superados de cada tema foram elencados. Além disso, convém salientar que algumas características particulares de cada tema, tais como parâmetros, métodos e considerações, serão apresentados e justificados no Capítulo 4. No próximo capítulo, serão apresentados os trabalhos relacionados a esta proposta de pesquisa com o intuito de identificar e validar as lacunas deste tema na literatura.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

Neste capítulo são apresentadas as abordagens que exploram o problema de posicionamento das estações transceptoras base no contexto de SAD, além de identificar as limitações encontradas em tais abordagens às quais esta pesquisa investiga. A seguir serão abordadas as principais contribuições dos trabalhos relacionados a este tema de pesquisa e que serviram de motivação para esta proposta.

Em [10], Costa propõe o uso de uma meta-heurística baseada em algoritmo memético, que é uma derivação dos algoritmos genéticos, para a resolução do problema de localização de eNodeBs. O trabalho aborda detalhes como o cálculo do alcance das antenas e a perda de sinal por degradação da distância. Determina a quantidade mínima de ERBs necessárias para cobrir uma dada região geográfica e realiza uma comparação com o sistema operando nas faixas de frequência de 700 MHz e 2,5 GHz.

Já em [6], Atta, Mukhopadhyay e Mahapatra propõem uma abordagem com base na utilização de algoritmo genético que realiza o refinamento local da solução para a convergência mais rápida na resolução do MCLP. Tal abordagem consiste em aplicar alterações nos cromossomos, por meio de um processo de clusterização, para determinar a localização e o número de facilidades, de forma a permitir a cobertura de todos os clientes.

Enquanto Bagherinejad *et al.* [7] tratam o problema de localização de cobertura máxima em multi-períodos. Apresentam uma proposta de modelagem matemática em extensão ao MCLP objetivando a maximização da cobertura. Empregam o *solver* Lingo para implementar uma solução exata e apresentam duas soluções meta-heurísticas baseadas no uso de algoritmo genético e colônia de abelhas. Comparam as soluções por métricas de velocidade e qualidade. Contudo, as abordagens citadas se limitam a um subconjunto do problema, não explorando as etapas já existentes nos algoritmos genéticos tradicionais.

Vallejo *et al.* [21] propõem um modelo analítico para avaliação do impacto de mudanças na potência de transmissão das eNodeBs num sistema LTE. Não tratam o problema de alocação das eNodeBs diretamente, dado que consideram o impacto das alterações da

potência de transmissão das eNodeBs em uma infraestrutura de rede pré-existente. Analisam seus impactos na interferência e na relação sinal-ruído (SINR) da célula da eNodeB e células vizinhas a partir das estatísticas da rede com o objetivo de reduzir a interferência entre células. O modelo é validado por meio de testes de campo em redes reais para avaliar a precisão das estimativas geradas e seus resultados revelam que ele atinge boa precisão, condicionada à baixa variação do tráfego na rede.

Em [22], Garcia *et al.* sugerem um método para otimização da área de cobertura por meio do ajuste da potência de transmissão das eNBs baseado no modelo matemático de Varoni. O método é testado com um conjunto de dados real retirado de uma rede LTE ativa.

Em [23], Ghosh, Saha e Kundu tratam a distribuição de SeNB (do inglês, *Small eNodeBs*) em um cenário de redes Heterogêneas LTE-A, definindo a quantidade e as posições ótimas dos SeNB. Modelam um cenário de HetNet (do inglês, *Heterogeneous Network*) utilizando os modelos de propagação sugeridos no 3GPP e utilizam um modelo de ponto de Poisson Homogêneo para fazer a distribuição dos UEs na área de cobertura de um MeNB (do inglês, *Macro eNodeB*). A distribuição dos SeNB não leva em consideração a ausência de cobertura pela MeNB, apenas fazem uma distribuição das SeNB por clusterização dos UEs utilizando o algoritmo K-means.

No trabalho [24], Grochla e Mariusz avaliam em um ambiente de rede LTE-A a necessidade de alterações nas configurações das potências de transmissão das eNBs previamente instaladas quando da implantação de novas MeNBs ou SeNBs. Quando novas células são implantadas, a potência de transmissão das estações base vizinhas precisam ser otimizadas para limitar as interferências entre as células. Os autores analisam o problema de seleção de vizinhança para a otimização, para definir que parte da rede precisa ser reconfigurada quando uma nova estação base é adicionada. Eles avaliam a abordagem iterativa, com o aumento da gama de células vizinhas sendo reconfiguradas e propõem um novo método de reconfiguração da potência de transmissão baseado em amostragem, que é avaliado por um modelo numérico.

Na obra [8] os autores propuseram dois modelos matemáticos fundamentados no problema de localização de conjuntos - SCP (do inglês, *Set Covering Problem*) para a resolução do problema de posicionamento de gNodeBs, no contexto de redes de sensores sem fio com suporte às redes 5G. O primeiro modelo objetiva apenas minimizar o custo de implantação, enquanto o segundo acrescenta também o objetivo de maximização da cobertura. Validaram suas propostas por meio de simulações pautadas em métricas de tempo. Não analisaram a qualidade dos resultados obtidos.

Yang *et al.* em sua pesquisa [11] apresentam o problema de localização de máxima cobertura contínua. Propõem duas modelagens matemáticas fundamentadas em progra-

mação linear inteira para os casos de período único e multiperíodo, ao considerar um cenário dinâmico de movimentação de veículos de comunicação para situações de resgate em cenários de desastres naturais. Eles validam seus modelos por meio de simulações pautadas em soluções exatas desenvolvidas no *solver* CPLEX. Avaliam a eficiência de suas soluções por meio de comparações com os resultados obtidos pelo algoritmo de clusterização k-means.

Massoud e Seyed em [9] exploram o problema de posicionamento MCLP considerando equipamentos com diferentes custos. Os autores propõem uma solução exata baseada no *solver* CPLEX, bem como propõem soluções utilizando algoritmos heurísticos e meta-heurísticos. Eles ajustam os hiperparâmetros do algoritmo genético por meio de discretizações da probabilidade de cruzamento, probabilidade de mutação e taxa de elitismo. Empregam o método Taguchi para definição dos valores ótimos destes hiperparâmetros, porém os discretizam em apenas três níveis possíveis. Seus resultados são validados pelos valores objetivo alcançados pelas soluções e respectivos tempos de processamento. As comparações ficam restritas às soluções por eles apresentadas.

No artigo [13], Alizadeh *et al.* estudam um problema de localização de cobertura máxima multiperíodo com a configuração de diferentes tipos de instalações em extensão ao MCLP. Para resolver o problema eles propõem dois limites superiores calculados por decomposição Lagrangiana e dois limites inferiores são derivados destes. Seus resultados demonstram que o emprego dos limites propostos ao MCLP obtém melhor desempenho e é preferido para resolver problemas de pequena e grande escala.

3.1 Discussão dos Trabalhos Relacionados

Com base nos trabalhos estudados anteriormente, a Tabela 3.1 apresenta um resumo comparativo entre os trabalhos da literatura quando comparados com esta proposta. Na tabela 3.1 foram destacadas as técnicas exploradas em cada um dos trabalhos relacionados, além de incluir novas contribuições que destacam esta pesquisa das demais. Observa-se que somente duas pesquisas [7, 9] realizaram a comparação das soluções meta-heurísticas com a solução exata. Outro ponto importante é o ajuste dos parâmetros e métodos, pouco explorados na literatura, identificado apenas nos trabalhos [6, 9].

Quase todos os trabalhos aqui analisados apresentam um único objetivo de otimização e visam encontrar uma solução com a maior área de cobertura [10, 6, 7, 22, 23, 11, 9, 13] ou a menor interferência entre as células [21, 24], com exceção do artigo [8] que além da maximização da cobertura, também visa a minimização do custo de implantação das gNodeB. Este projeto de pesquisa pretende ir além ao abordar os três objetivos de

Tabela 3.1: Comparação com os trabalhos relacionados.

Trabalho	Modelagem matemática	Solução exata	Heurísticas ou Meta-heurísticas	Ajuste dos hiperparâmetros	Métricas de qualidade	Métricas de velocidade	Métricas de confiabilidade	Minimização do custo	Minimização da interferência	Maximização da cobertura	Potência de Tx variável
[Costa16]	✓		✓			✓				✓	
[Atta18]	✓			✓	✓	✓				✓	
[Bagheja18]	✓	✓	✓		✓	✓				✓	
[Vallejo18]									✓		✓
[Garcia18]										✓	✓
[Ghosh19]	✓	✓								✓	
[Grochla19]									✓		✓
[Seda20]	✓	✓								✓	
[Yang20]	✓	✓			✓	✓		✓		✓	
[Gazani21]	✓	✓	✓	✓	✓	✓				✓	
[Alizadh21]	✓									✓	
Este trabalho	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

forma conjunta ao propor uma otimização multiobjetivo que leve em consideração diversos aspectos relevantes ao tema e que são conflitantes entre si.

As limitações anteriormente apresentadas indicam um campo de pesquisa promissor a ser explorado nesta pesquisa e que se destaca por apresentar as seguintes contribuições:

- um modelo matemático multiobjetivo ajustado às necessidades do projeto CCOP Mv;
- uma técnica de modelagem de cenários reais que pode ser reaproveitada em pesquisas semelhantes e que envolvam alocação de recursos geograficamente distribuídos;
- soluções para cenários de comunicação crítica e de infraestrutura inexistente; e
- soluções otimizadas validadas por simulações em comparação a um *baseline* bem difundido na literatura para alocações de recursos que envolvam distribuições espaciais, o algoritmo de clusterização k-means.

Capítulo 4

Projeto de Pesquisa

Neste capítulo, é apresentada a metodologia proposta para este projeto de pesquisa que é a elaboração de um Serviço de Apoio à Decisão do CCOp Mv para minimizar a quantidade de viaturas empregadas e otimizar a localização geográfica das mesmas, de forma a maximizar a área de cobertura das operações militares em cenários críticos. Serão discutidos a modelagem do cenário, o modelo matemático proposto para descrever o problema de otimização e sua definição, bem como as soluções de otimização propostas, a formulação dos experimentos a serem realizados e os métodos de avaliação.

4.1 Projeto: Serviço de Apoio à Decisão do CCOp Mv

Este trabalho propõe um SAD para tratar do problema de posicionamento dos eNodeB do CCOp Mv em regiões onde a infraestrutura de comunicação é precária, ou mesmo inexistente, sob a ótica de uma rede 4G/LTE. Para tanto, foram modeladas duas soluções otimizadas para lidar com o problema MCLP no contexto do CCOp Mv, sendo elas:

- (i) E-ALLOCATOR que é uma solução exata com base em Programação Linear Inteira Mista; e
- (ii) M-ALLOCATOR que é uma solução meta-heurística de natureza combinatória baseada em algoritmo genético.

O serviço proposto tem como objetivo principal cobrir o maior número de pontos de demanda com a menor interferência entre eNodeBs, ao mesmo tempo que provê uma maior área de apoio nas operações que necessitam de comunicação crítica.

Na Figura 4.1 é apresentado o cenário de funcionamento do serviço proposto no processo de alocação dos veículos/eNodeBs. A idealização desta proposta surgiu a partir do CCOp Mv, cujo objetivo é prover os meios de comando e controle necessários para coor-

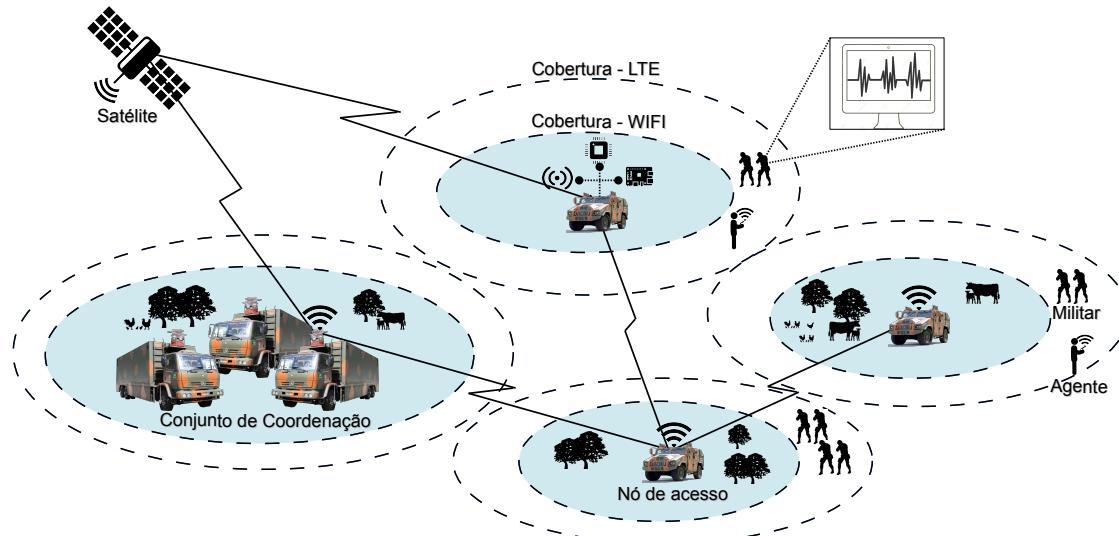


Figura 4.1: Cenário de funcionamento do serviço de apoio à decisão do CCOP Mv.

denação das operações do Exército Brasileiro. Trata-se de um projeto destinado a suprir a Força Terrestre da infraestrutura de TIC necessária ao apoio das operações terrestres em ambientes desprovidos de infraestrutura de comunicações. A composição do CCOP Mv foi abordada no Capítulo 1.3, porém cabe destacar que os veículos do Conjunto de Coordenação operam juntos e, portanto, neste trabalho são considerados como ocupantes de uma única posição de alocação. Este serviço irá determinar a posição de até 9 viaturas portadoras dos eNodeBs.

Desta forma, as soluções apresentadas neste trabalho para o problema de posicionamento dos eNodeBs, vão além da questão científica na resolução do problema, passando pela sua aplicação prática no escopo do CCOP Mv.

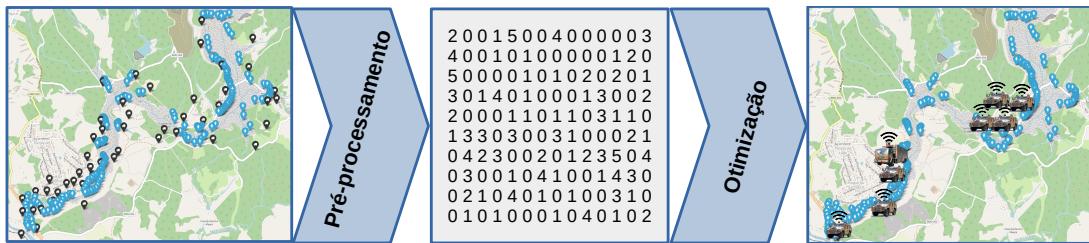


Figura 4.2: Etapas do serviço proposto.

Para resolver o problema de alocação dos eNodes do CCOP Mv, dividiu-se a atuação do sistema proposto em duas etapas: (i) pré-processamento; e (ii) otimização. A Figura 4.2 ilustra estas duas etapas. Na etapa de pré-processamento, as matrizes de pesos e conectividade são geradas por meio dos dados geográficos do terreno, tais como: latitude, longitude e elevação. Essas informações são utilizadas para determinar a existência ou não de linha de visada (LOS, do inglês *Line Of Sight*) entre a posição geográfica dos eNo-

dBs e dos usuários do sistema. Além disso, também são consideradas as características de propagação dos sinais sem fio, interferência, relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* ou SNR), desvanecimento do sinal, potência de transmissão e recepção, bem como seus limiares de aceitação para a definição da efetividade da comunicação de rádio.

Inicialmente, nesta etapa, utilizou-se o modelo de propagação de Okumura Hata [25], o qual provê a predição da potência do sinal recebido nas diversas posições do terreno. As informações obtidas com este modelo servem de entrada para a segunda etapa da solução proposta, a fase de otimização. Nesta etapa, as soluções propostas E-ALLOCATOR e M-ALLOCATOR utilizam as informações de pré-processamento para a definição da quantidade e dos locais onde as viaturas do CCOp Mv devam ser posicionadas, de forma a permitir uma maior área de cobertura para o sistema 4G/LTE. Cabe destacar que este é um ponto de melhoria que será implantado no SAD até então desenvolvido. Pretende-se adotar a modelagem do cenário de simulação proposto nos *Technical Reports* TR-36.814 [26] e TR-36.872 [27] que adotam distintos modelos de predição de acordo com as distâncias entre UE e eNodeB, além de outras características como a existência ou não de visada direta.

Para facilitar a compreensão desta proposta, a seguir, será apresentada a técnica utilizada na construção do cenário. Os elementos constituintes do cenário irão dar mais clareza e sentido à etapa seguinte que é a modelagem analítica do problema.

4.1.1 Modelagem dos Cenários

Os cenários criados para as avaliações das soluções foram baseados na tragédia de Brumadinho-MG. Tratam-se de cenários fictícios que ilustram o emprego do CCOp Mv em apoio a uma operação de resgate das vítimas do rompimento da Barragem da Mina Córrego do Feijão. Segundo [28] o rompimento da barragem em 25 de janeiro de 2019 foi o maior acidente de trabalho no Brasil em perda de vidas humanas e o segundo maior desastre industrial do século. Foi um dos maiores desastres ambientais da mineração do país, depois do rompimento de barragem em Mariana-MG. Causou a morte de 270 pessoas, incluindo nove desaparecidas. Sob administração da mineradora Vale S.A., a barragem de rejeitos era classificada pela empresa como de “baixo risco” e “alto potencial de danos”. Acumulando os rejeitos de um mina de ferro, ficava no ribeirão Ferro-Carvão, na região de Córrego do Feijão, no município de Brumadinho, estado de Minas Gerais. A área de atuação das equipes de resgate e de apoio das viaturas do CCOp Mv foi discretizada conforme representado na Figura 4.3. Os cenários apresentam uma extensão de 6.090 metros de comprimento (longitude) por 4872 metros de largura (latitude), o que equivale a uma área de cerca de 30 km^2 . G_{ij} é definido como o mapa de Brumadinho, delimitado pelos pontos de coordenadas (-20.115437, -44.16269), (-20.159446, -44.16269), (-20.159446, -44.10444)

e $(-20.115437, -44.10444)$, setorizado por delimitadores geográficos formando as quadrículas. Onde $i \in \{1, 2, 3, \dots, I\}$ e $j \in \{1, 2, 3, \dots, J\}$, sendo que I é o cardinal do conjunto que divide longitudinalmente e J é o cardinal do conjunto que divide latitudinalmente o cenário.

De posse desta definição, os cenários foram divididos nas dimensões conforme a Tabela ??, que impactam diretamente e progressivamente no tamanho das cargas de trabalho das soluções de otimização propostas e na precisão do sistema.

ro

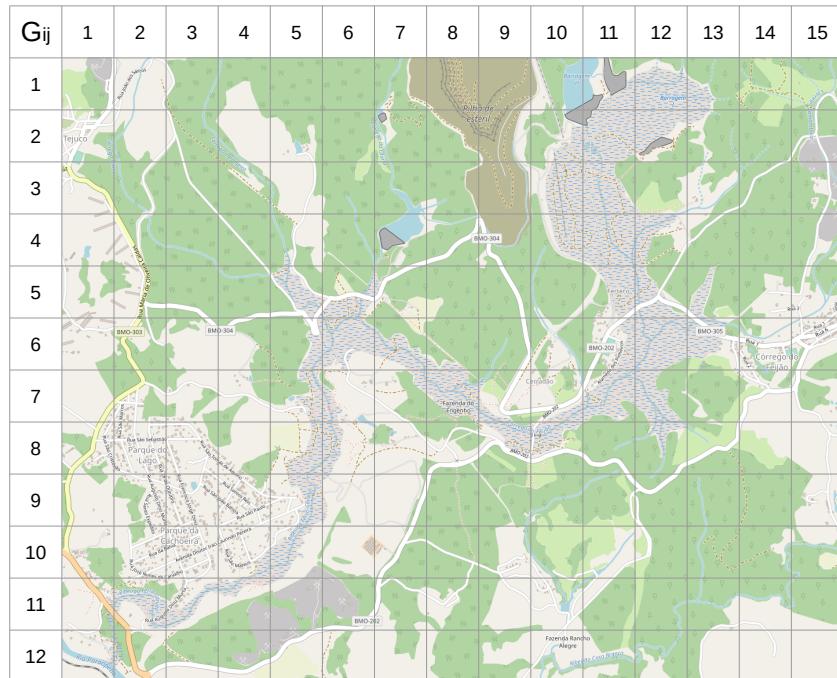


Figura 4.3: Mapa setorizado por quadrículas geográficas - cenário Brum1215.

Devido às características do terreno, nem todos os setores podem ser populados com eNodeBs. Por serem transportados por veículos, podemos tomar como referência as rotas rodoviárias para limitar o posicionamento dos eNodeBs. Ressalta-se que essas limitações podem ser por outros motivos, tais como relevos muito íngremes, presença de rios, vegetações muito densas ou outros fatores. A partir deste princípio e tendo como base os cenários propostos, define-se a matriz M_{ij} , conforme exemplificado na Figura 4.4. Trata-se de uma matriz binária onde os setores demarcados com o valor 1 significam que um eNodeB pode ser instalado e 0 caso contrário.

Os usuários do sistema precisam ser atendidos para dar suporte às comunicações durante a operação de resgate das vítimas da tragédia. Para tanto eles são espalhados pelo cenário e suas localizações são consolidadas pelas quadrículas em que foram alocados. Do exposto, a matriz N_{ij} , ilustrada na Figura 4.7, representa o número de usuários por setor.



Figura 4.4: Matriz que delimita as quadrículas aptas à implantação dos eNodeBs no cenário Brum1215.

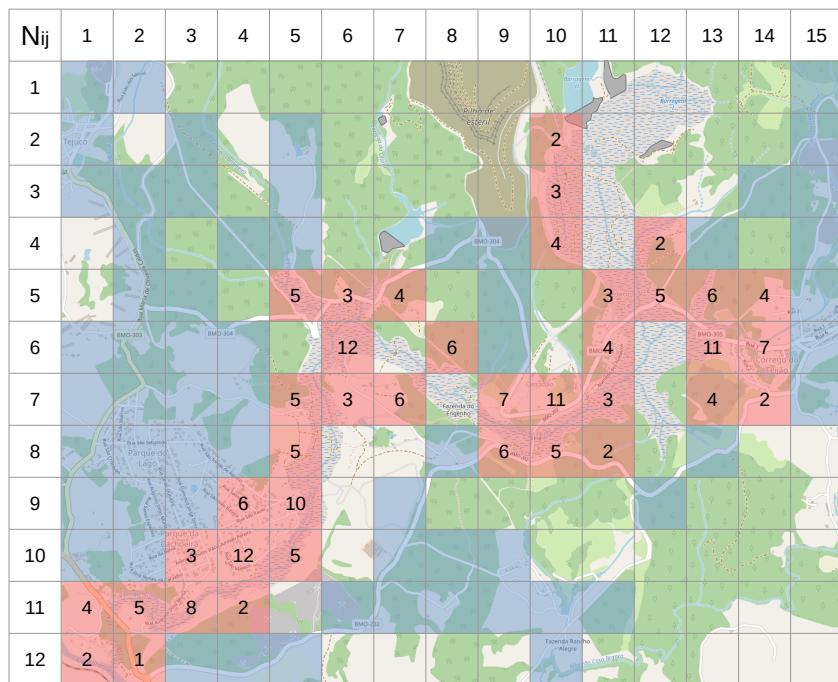


Figura 4.5: Matriz que clusteriza os clientes do sistema LTE no cenário Brum1215.

S _{mp}	2,10	2,10	4,10	4,12	5,5	5,6			11,1	11,2	11,2	11,4	12,1	12,2
S _{mp}	2,10	2,10	4,10	4,12	5,5	5,6			11,1	11,2	11,2	11,4	12,1	12,2
1,1	0	0	0	0	3	3	.	.	0	0	0	0	0	0
1,2	0	0	0	0	3	4	.	.	0	0	0	0	0	0
1,15	3	2	2	4	0	0	.	.	0	0	0	0	0	0
2,1	0	0	0	0	3	2	.	.	0	0	0	0	0	0
2,3	1	1	1	0	5	4	.	.	0	0	0	0	0	0
.
.
12,1
12,3	0	0	0	0	1	1	.	.	5	5	5	5	5	5
12,4	0	0	0	0	1	1	.	.	5	5	5	5	5	5
12,5	0	0	0	0	1	1	.	.	4	4	5	5	5	5
12,10	0	0	1	1	1	1	.	.	0	0	0	1	0	0

Figura 4.6: Cenário Smnp.

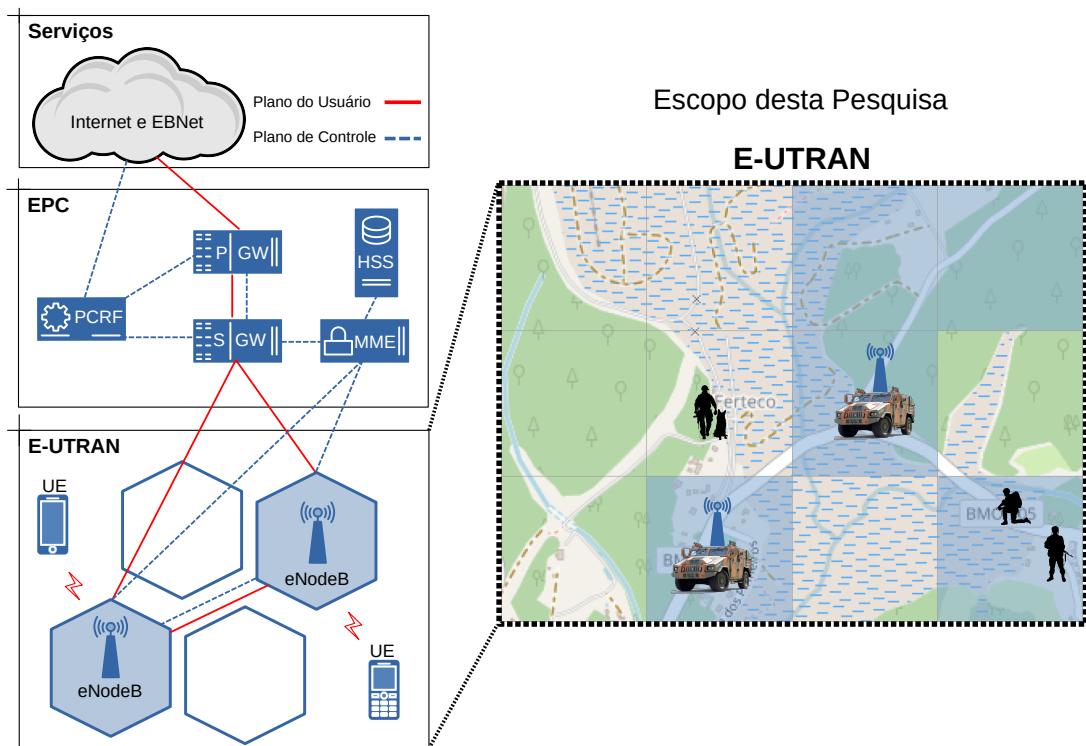


Figura 4.7: Arquitetura.

Cada eNodeB entrega uma relação sinal ruído diretamente relacionada com modelos empíricos de *path loss*, desvanecimento rápido e desvanecimento lento (explorados por [3] e [26]) condicionada às características do relevo e vegetação de Brumadinho, da existência ou não de visada direta, além da distância entre eNodeB e UE. Nesse caso, criando-se uma função de conexão ς baseada na posição de cada elemento conectado $\varsigma(m, n) \in \Re$ em que $m \in M_{ij}$ e $n \in N_{ij}$. Iterando-se todos eNodeBs m e todos UEs n obtém-se uma matriz quadridimensional $S \in \Re_{IJ \times IJ}$ que expressa de forma discretizada a qualidade do sinal obtido pelo relacionamento entre eNodeBs e UEs.

A função $\varsigma(m, n)$ proposta é fundamentada na modelagem do cenário de simulação RMa (*Rural Macro-Cell*) proposta no *Technical Report TR-36.814, release 9* do 3GPP [26], que adota distintos modelos de predição de acordo com as distâncias entre UE e eNodeB, além de outras características como a existência ou não de visada direta. Sua escolha é justificada, dado que as características do terreno delimitadas por G_{ij} são aderentes às restrições de emprego especificadas pelo cenário RMa e por este se tratar de um cenário testado e consolidado pela literatura e pelo 3GPP.

É importante salientar que os valores da função de conexão $\varsigma(m, n)$ foram definidos a partir dos valores representativos do gráfico de intensidade do sinal de um *smartphone* Samsung S10 que possui uma antena de recepção com ganho de 0dB_i, definidos em [29, 30]. Assim, a potência do sinal predito pelos modelos em RMa foi discretizada em 6 níveis para atribuição à matriz S conforme a seguir:

$$\varsigma(m, n) = \begin{cases} 5, & \text{se a potência predita } \geq -85\text{dBm;} \\ 4, & \text{se a potência predita } \geq -90\text{dBm;} \\ 3, & \text{se a potência predita } \geq -95\text{dBm;} \\ 2, & \text{se a potência predita } \geq -100\text{dBm;} \\ 1, & \text{se a potência predita } \geq -105\text{dBm;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

4.1.2 Modelo do Serviço

Nesta subseção é apresentada a modelagem matemática do serviço e a formulação do problema de otimização adotado. O problema foi modelado a partir da associação dos UEs com os eNodeBs que serão posicionados em diferentes regiões geográficas como detalhado na seção anterior. A Tabela 4.1 apresenta as notações usadas na modelagem e na definição do problema.

Tabela 4.1: Notações usadas na modelagem e definição do problema.

Notação	Parâmetro
$G(\mathcal{M} \cup \mathcal{N}, S)$	Grafo do sistema
\mathcal{M}	Conjunto de localidades para instalação dos eNodeBs
\mathcal{N}	Conjunto de posições de demanda dos UEs
m	Um setor de \mathcal{M} apto a receber um eNodeB
n	Um setor de \mathcal{N} com clientes do sistema ou UEs
$\varsigma(m, n)$	Função de conexão
S	Matriz de adjacências ou conjunto de arestas
s_{mn}	Aresta ponderada do sistema entre o eNodeB da posição m e os UEs da posição n
C	Matriz de conectividade entre eNodeBs e UEs
c_{mn}	Aresta binária do sistema entre o eNodeB da posição m e os UEs da posição n
ϕ	Número máximo de eNodeBs a serem instalados
ψ	Número máximo de clientes suportados por eNodeB
y_m	Variável de decisão da posição de instalação do eNodeB m
x_n	Variável de decisão da localidade de clientes n
$G'(\mathcal{M}, A)$	Grafo de interconexão dos eNodeBs
A	Matriz de conectividade entre os eNodeBs
a_{mk}	Elemento da matriz de conectividade A entre os eNodeBs das posições m e k
ξ	Número mínimo de eNodeBs interconectados

A modelagem é fundamentada em Programação Linear Inteira Mista - PLIM e é iniciada pela definição do conjunto $\mathcal{M} = \{m_{11}, m_{12}, \dots, m_{1j}, m_{21}, m_{22}, m_{2j}, \dots, m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{ij}\}$ de nós que representam as possíveis localidades para instalação dos eNodeBs e do conjunto $\mathcal{N} = \{n_{11}, n_{12}, \dots, n_{1j}, n_{21}, n_{22}, n_{2j}, \dots, n_{i1}, n_{i2}, \dots, n_{ij}\}$ de nós que representam as localizações dos clientes do sistema de comunicação. Cada par de nós (m, n) compõe uma aresta conectada quando $\{m \in \mathcal{M} \text{ e } n \in \mathcal{N} \mid \varsigma(m, n) \neq 0\}$, no qual $\varsigma(m, n)$ representa a função de conexão e assume os valores entre 1 e 5 que denotam a potência do sinal recebido, quando a posição de clientes n pode ser atendida pela eNodeB situada na posição m , e 0 caso contrário. A função de conexão pode ser iterada considerando as combinações entre todos os M nós com todos os N nós para gerar a matriz de adjacências $S = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}_{M \times N}$, do conjunto de arestas. A partir do conjunto de arestas S deriva-se a matriz binária de conectividade C que tem as mesmas dimensões que S , porém com valores binários, $C = \{0, 1\}_{M \times N}$. Seja $s_{mn} \in S$ e $c_{mn} \in C$, esta derivação segue a seguinte regra:

$$c_{mn} = \begin{cases} 1, & \text{se } s_{mn} \neq 0; \\ 0, & \text{se } s_{mn} = 0. \end{cases}$$

Portanto, nosso serviço pode ser definido pelo grafo bipartido $G(\mathcal{M} \cup \mathcal{N}, S)$.

O grafo $G'(\mathcal{M}, A)$, que modela as conexões entre os eNodeBs, é definido de maneira análoga, no entanto os vértices são elementos apenas do conjunto \mathcal{M} . Os pesos de suas arestas também são determinados pela iteração da função de conexão $\varsigma(m, k)$, para $m \in$

\mathcal{M} , pelas permutações dos nós do conjunto \mathcal{M} , gerando assim a matriz de adjacências deste subsistema que é convertida na matriz de conectividade entre os eNodeBs $A = \{0, 1\}_{M \times M}$, com elementos $a_{mk} = \{0, 1\}$ de forma similar à conversão de S em C no grafo do sistema.

4.1.3 Definição do Problema

Nesta subseção, o problema de localização dos eNodeBs do CCOp Mv será decidido como uma extensão do MCLP. Para isso, defini-se as variáveis de decisão, as restrições e os objetivos do MCLP para, em seguida, propor um problema de programação linear inteira mista. As variáveis de decisão definidas e seus significados são dados por:

$$y_m = \begin{cases} 1, & \text{se o setor } m \text{ foi escolhido para ter um eNodeB instalado;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$$x_n = \begin{cases} 1, & \text{se o setor de clientes } n \text{ está associado a algum eNodeB que lhe dê cobertura;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

Para a construção do nosso modelo, foram definidas seis restrições:

- *Restrição 4.1* - Define que para um setor de clientes na posição n (x_n) ser atendido é necessário que ao menos um eNodeB na posição m (y_m) que lhe dê cobertura seja instalado:

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} y_m \cdot c_{mn} \geq x_n , \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (4.1)$$

onde c_{mn} terá o valor de 1, caso o eNodeB na posição m consiga atender o usuário em n .

- *Restrição 4.2* - Cada eNodeB na posição m (y_m) consegue atender uma quantidade máxima de usuários (ψ) sendo associados a ele ($\sum_{n \in \mathcal{N}} x_n \cdot c_{mn}$). A quantidade máxima de usuários é um parâmetro específico do eNodeB e pode variar significativamente de um fabricante para outro. Além disso, esse parâmetro é influenciado por sua banda de operação, pelo fator de utilização esperado e pela capacidade de *downlink* e *uplink* desejadas para cada usuário.

$$\sum_{n \in \mathcal{N}} x_n \cdot c_{mn} \leq \psi , \quad \forall m \in \mathcal{M} \quad (4.2)$$

- *Restrição 4.3* - Estabelece que o número de eNodeBs instalados não deve exceder ao número máximo disponível (ϕ).

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} y_m \leq \phi \quad (4.3)$$

- *Restrição 4.4* - A rede móvel deve estar sempre conectada para prover serviços. Como os eNodeBs são nós móveis, os mesmos devem participar de uma rede entre si para escoamento de dados. Por exemplo, na minuta do projeto CCOp Mv, determina-se que um nó de acesso deve se conectar a pelo menos outros 3 nós para operação correta. Nesse caso, um eNodeB (y_m) deve se conectar a no mínimo (ξ) outros eNodeBs caso eles possam ser interconectados ($a_{nk} = 1$).

$$\sum_{m \in \mathcal{M}} y_m \cdot a_{mk} \geq \xi \quad , \quad \forall k \in \mathcal{M} \quad (4.4)$$

- *Restrição 4.5* - Natureza binária da variável aleatória x_n .

$$x_n \in \{0, 1\} \quad , \quad \forall n \in \mathcal{N} \quad (4.5)$$

- *Restrição 4.6* - Natureza binária da variável aleatória y_m .

$$y_m \in \{0, 1\} \quad , \quad \forall m \in \mathcal{M} \quad (4.6)$$

Diante do exposto, o nosso modelo matemático possui dois objetivos, como apresentado na Equação 4.7: (i) Minimizar o número de eNodeBs empregados no CCOp Mv para reduzir o desperdício de recursos computacionais e financeiros; e (ii) Maximizar a área de cobertura do sistema LTE do CCOp Mv, em que $\top(s_{mn})$ consiste no maior valor da função de conexão entre os eNodeBs (y_m) instalados e que atendem aos clientes da quadrícula n . Isso é coerente com a realidade, já que os dispositivos se associam ao eNodeB que lhe provê o sinal mais forte.

$$\text{Min } \sum_{m=1}^M y_m \quad , \quad \text{Max } \sum_{n=1}^N \top(s_{mn}) \cdot x_n \quad (4.7)$$

4.1.4 Soluções Otimizadas

A modelagem analítica do problema de alocação dos eNodeBs do CCOp Mv, com base em PLIM, serviu de base para as soluções E-ALLOCATOR e M-ALLOCATOR.

E-ALLOCATOR

Com o objetivo de percorrer todo o espaço de busca para tratar do problema de posicionamento dos eNodeBs do CCOP Mv, foi proposto o E-ALLOCATOR: uma solução exata com base no algoritmo *Branch and Bound* (B&B) para PLIM, como apresentado no Algoritmo 1. Para tanto, o Algoritmo 1 inicia percorrendo o espaço de busca (linhas 7-25). Em seguida, analisa as soluções que atendam às restrições do modelo apresentadas na Subseção 4.1.3, excluindo as soluções infactíveis, *i.e.*, que não atendem às restrições (linhas 9 e 10), ou que apresentem resultados inferiores aos já analisados (linhas 12 e 13). Com isso, o método de busca por ponto inteiro, também conhecido como método Simplex é utilizado. Por se tratar de uma variável inteira, os resultados obtidos de maneira relaxada, *i.e.*, $y_n \notin Z_+$ são subdivididos novamente (linhas 15 a 19) e, em seguida o processo é novamente repetido. Nesse caso, a relaxação linear do modelo se dá pelo limitante superior. Para garantir que a melhor solução encontre o menor número de eNodeBs, o processamento anterior é repetido para um número máximo de eNodeBs ϕ (linha 3). Por último, salienta-se que os resultados são atualizados caso sejam encontradas soluções melhores com um número maior de eNodeBs instalados (linhas 26-30). A solução desenvolvida utilizou o solver CBC-MIP do framework ORTools¹.

M-ALLOCATOR

Para tratar os problemas de otimização do tipo NP-Completo, as soluções propostas podem ser resolvidas de maneira exata para instâncias cujo problema é pequeno e que esteja dentro de um período aceitável de tempo. Com o intuito de sanar essa limitação, foi proposto o M-ALLOCATOR que é uma meta-heurística que visa encontrar uma boa solução (sem garantia de ser a ótima) com base em um Algoritmo Genético - AG, como apresentado no Algoritmo 2. Para tanto, uma população inicial é instanciada aleatoriamente (linha 3). Em seguida, o grau de adaptação de cada indivíduo é obtido por meio da aplicação da função de aptidão (linha 5). Caso o grau de adaptação do indivíduo mais adaptado encontrado na geração atual seja melhor do que o da geração anterior, os valores da melhor aptidão e o indivíduo melhor adaptado são armazenados para futuras comparações (linhas 6 a 11). Com isso, é realizado o processo evolutivo do AG que são a aplicação dos métodos de seleção, reprodução e mutação para composição da próxima geração (linhas 12 a 15). Para garantir que a melhor solução encontre o menor número de eNodeBs, o processamento anterior é repetido para um número máximo de eNodeBs ϕ (linha 3). Por último, salienta-se que os resultados são atualizados caso sejam encontradas

¹<https://pypi.org/project/or-tools/>

Algoritmo 1: E-ALLOCATOR

```
1 Entrada:  $S, C, A, \phi, \psi$  e  $\xi$ 
2 Inicialize:  $Obj^{**} = -\infty$  e  $y^{**} = \emptyset$ ;
3 for  $nreNodeBs = \xi + 1$  até  $\phi$  do
4   Inicialize:  $Obj^* = -\infty$  e  $y^* = \emptyset$ ;
5   Gere aleatoriamente  $y$  = nó da árvore de busca;
6   Resolva o problema pelo método Simplex;
7   while  $\exists$  subproblema a ser investigado do
8     Resolva os 2 subproblemas pelo método Simplex;
9     if subproblema é infactível then
10       descarte-o;
11     else
12       if  $Obj(y) \leq Obj^*$  then
13         descarte-o;
14       else
15         if  $Obj(y) \notin Z_+$  then
16           escolha  $y_m$  que tenha um valor  $\neq \{0, 1\}$  em  $y$ ;
17           crie 2 novos subproblemas adicionando a restrição:
18              $y_m = 0$  para o primeiro subproblema e
19              $y_m = 1$  para o segundo subproblema;
20           else
21              $Obj^* \leftarrow Obj(y)$ ; e  $y^* \leftarrow y$ ;
22           end
23         end
24       end
25     end
26     if  $Obj^*(y^*) > Obj^{**}$  then
27        $Obj^{**} \leftarrow Obj^*$ ; e  $y^{**} \leftarrow y^*$ ;
28     else
29       mantém o resultado anterior
30     end
31 end
32 Saída: Vetor  $y^{**}$  com o menor número de eNodeBs e respectivas localizações ótimas.
```

soluções melhores com um número maior de eNodeBs instalados (linhas 19-23). A solução desenvolvida utilizou a biblioteca PyGAD²³.

Algoritmo 2: M-ALLOCATOR

```

1 Entrada:  $S, C, A, \phi, \psi$  e  $\xi$ 
2 Inicialize:  $Obj^{**} = -\infty$  e  $y^{**} = \emptyset$ ;
3 for  $nreNodeBs = \xi + 1$  até  $\phi$  do
4   Inicialize:  $Obj^* = -\infty$  e  $y^* = \emptyset$ ;
5   Gere aleatoriamente a população inicial;
6   for  $geração=1$  até  $g$  do
7     calcule o grau de adaptação de cada indivíduo da população atual;
8     if maior grau de adaptação  $\geq Obj^*$  then
9        $Obj^* \leftarrow$  maior grau de adaptação entre os indivíduos da população;
10       $y^* \leftarrow$  indivíduo com o maior valor de aptidão;
11    else
12      | mantenha os valores de  $Obj^*$  e  $y^*$  anteriores;
13    end
14    execute a seleção dos indivíduos que serão os pais da próxima geração;
15    execute a reprodução entre os pais e gere os novos descendentes;
16    execute a mutação com probabilidade  $p_m$ ;
17    atualize os indivíduos da próxima geração;
18  end
19  if  $Obj^*(y^*) > Obj^{**}$  then
20    |  $Obj^{**} \leftarrow Obj^*$ ; e  $y^{**} \leftarrow y^*$ ;
21  else
22    | mantém o resultado anterior
23  end
24 end
25 Saída: Indivíduo  $y^{**}$  com o menor número de eNodeBs e respectivas localizações com melhor
grau de adaptação.
```

A representação das possíveis soluções do espaço de busca determina a estrutura cromossômica, *i.e.*, a estrutura de um indivíduo. A estrutura proposta nesta pesquisa reflete as posições possíveis das eNodeBs e, portanto, foi constituída de uma matriz com M posições ocupadas por genes binários, 0's ou 1's. Cada gene definido como 1 representa a instalação de uma antena na posição desse gene.

A função de aptidão é o mecanismo pelo qual a adaptabilidade de um cromossomo ou indivíduo é avaliada. Neste contexto, a função de aptidão consistiu em uma implementação da função objetivo (Equação 4.7) e das restrições 4.1 e 4.2 modeladas na Subseção 4.1.3. As restrições 4.5 e 4.6 foram garantidas pela natureza binária do gene. Já a Restrição 4.3 foi implementada por meio de um mecanismo de validação para cada alteração genética, seja na instanciação dos indivíduos da primeira geração, na reprodução ou

²<https://pygad.readthedocs.io/en/latest/>

³<https://pypi.org/project/pygad/>

na mutação. Por último, a Restrição 4.4 foi garantida por um mecanismo de recompensa para as situações que respeitam esta restrição e penalidade para os outros casos.

Para otimizar os hiperparâmetros do AG modelado no M-ALLOCATOR, utilizou-se a biblioteca Hyperas⁴ desenvolvida no trabalho [31]. A Tabela 4.2 apresenta o conjunto de hiperparâmetros utilizados para otimização, nos quais os melhores valores encontrados estão destacados em negrito.

Tabela 4.2: Hiperparâmetros otimizados.

Hiperparâmetro	Valor
Probabilidade de cruzamento	[0.1 \vdash 0.77 \dashv 1]
Probabilidade de mutação	[0.1 \vdash 0.79 \dashv 1]
Taxa de elitismo	[0.1 \vdash 0.86 \dashv 1]
Tamanho da população	{10, 20 ... 110 ... 200}, variando de 10 em 10
Número de gerações	{10, 11 ... 78 ... 100}, variando de 1 em 1
Número de pais para reprodução	{2, 4 ... 8 ... 20}, variando de 2 em 2

Além de ajustar os hiperparâmetros, foram avaliados os resultados obtidos pelos métodos de seleção, reprodução e mutação. Na literatura foram identificados seis principais mecanismos de seleção, os quais foram analisados neste trabalho: (i) Estado Estável (EE); (ii) Roleta (R); (iii) Estocástico (E); (iv) Truncamento (Tr); (v) Aleatório (A); e (vi) Torneio (To). Relativamente aos métodos de reprodução, foram avaliados os métodos de troca genética por: (i) um Ponto Simples (PS); (ii) Dois Pontos (DP); (iii) Uniforme (U); e (iv) Espalhamento (Es). Já na fase de mutação, foram avaliados os três métodos: (i) Troca (T); (ii) Inversão (I); e (iii) Embaralhamento (Em).

4.1.5 Métricas e *Baseline* Propostos

Métricas de Qualidade

- Área de cobertura de cada solução.
- Sobreposições de sinal promovendo interferência:
 - Áreas com sobreposição de sinal de 2 eNodeBs;
 - Áreas com sobreposição de sinal de 3 eNodeBs;
 - Áreas com sobreposição de sinal de 4 eNodeBs;
 - Áreas com sobreposição de sinal de 5 eNodeBs;
 - Áreas com sobreposição de sinal de 6 eNodeBs;
 - Áreas com sobreposição de sinal de 7 eNodeBs;

⁴<https://github.com/maxpumperla/hyperas>

- Áreas com sobreposição de sinal de 8 eNodeBs e
- Áreas com sobreposição de sinal de 9 eNodeBs.
- Valor objetivo alcançado.

Métricas de Confiabilidade

- PRD (Porcentagem Relativa de Desvio): desvio da solução M-ALLOCATOR relativo aos valores obtidos pela solução E-ALLOCATOR.

Métricas de Velocidade

- Tempo de processamento.
- Convergência da solução M-ALLOCATOR.

Baseline

Os resultados obtidos pelas soluções propostas serão comparados com os obtidos pelo algoritmo de clusterização k-means. De forma similar ao procedimento adotado em [11], o algoritmo k-means será adotado para particionar os pontos de demanda no mesmo número de veículos de comunicação que os obtidos pelas soluções de modo a termos uma comparação justa. As posições de demanda N_{ij} com semelhanças de distância serão agrupadas no mesmo cluster e, portanto, atendidos por um eNodeB. Assim, os centros dos clusters serão definidos como os locais-alvo para instalação dos eNodeBs.

4.2 Plano de Trabalho e Cronograma

Esta seção apresenta as atividades propostas para este projeto de pesquisa juntamente com um cronograma de acompanhamento. Planeja-se finalizar o projeto em dois anos de atividades. A Tabela 4.3 apresenta o cronograma de atividades deste plano de trabalho. A seguir é apresentada uma descrição de cada atividade presente no cronograma, respeitando o tempo estabelecido pelo Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada da Universidade de Brasília (PPCA/UnB) para a obtenção do título de Mestre.

- 1. Obtenção dos créditos obrigatórios exigidos pelo programa de mestrado e feitura do exame de proficiência em Inglês.** As disciplinas do mestrado foram iniciadas de forma remota no 1º trimestre de 2020, porém em virtude da pandemia do COVID-19, as atividades foram suspensas durante os 2º e 3º trimestres. Foram retomadas apenas no 4º trimestre de 2020. Foram obtidos 22 dos 24 créditos

obrigatórios com as seguintes menções: (i) Algoritmos e Estruturas de Dados com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (ii) Fundamentos de Banco de Dados com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (iii) Análise Estatística de Dados e Informações com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (iv) Mineração de Dados com 2 créditos, sendo aprovado com menção MS; (v) Fundamentos em Pesquisa Operacional com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (vi) Gestão de Projetos de TI com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (vii) Redes de Acesso com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (viii) Convergência de Redes com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (ix) Armazenamento e Gerenciamento de Informações com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; (x) Tópicos em Sistemas Distribuídos com 2 créditos, sendo aprovado com menção MS; e (xi) Tópicos Avançados em Infraestrutura de TI com 2 créditos, sendo aprovado com menção SS; Já a proficiência em Inglês foi obtida antes do início das atividades do mestrado.

2. **Revisão da literatura, fundamentação teórica e apresentações.** Esta etapa se estende ao longo do desenvolvimento do projeto, com atualizações periódicas. Assim sendo, serão feitas reuniões constantes com o orientador e com o grupo de pesquisa, além de serem apresentados seminários relacionados ao tema do projeto.
3. **Redação e exame da qualificação.** Nesta etapa é elaborada uma monografia como pré-requisito para o exame de qualificação, contendo uma fundamentação teórica crítica na área de trabalho do discente e o projeto de pesquisa a ser desenvolvido. Para o exame de qualificação, o discente deverá defender sua proposta para uma comissão examinadora. Para tanto, o discente deverá realizar uma apresentação oral seguida de uma arguição por parte da banca.
4. **Proposta de um serviço de apoio à decisão para tratar do problema de posicionamento dos eNodeB do CCOp Mv em regiões onde a infraestrutura de comunicação é precária, ou mesmo inexistente, sob a ótica de uma rede 4G/LTE.** Esta etapa compreende a concepção e implementação de uma modelagem do cenário de emprego do CCOp Mv, de uma modelagem matemática analítica do problema baseada e Programação Linear Inteira Mista e de soluções de otimização para maximizar a área de cobertura e ao mesmo tempo reduzir o número de eNodeBs empregados. Deve-se ressaltar que o essencial para testes preliminares já foi implementado e seus resultados publicados no Workshop de Gerencia de Redes e Serviços do SBRC (WGRS/SBRC) em 2021. Tais testes servirão para identificar possíveis ajustes, os quais serão solucionados para realizar uma nova avaliação.
5. **Planejar, realizar e analisar os experimentos.** Esta etapa avalia o desempenho das soluções propostas, comparando-as com as soluções existentes na literatura,

sendo realizada a cada etapa de implementação. Ainda, uma análise das soluções, visando generalizar os resultados obtidos para outros domínios e aplicações que sejam viáveis ao tema deste projeto será feita.

6. **Publicação dos resultados.** Realizada paralelamente às demais atividades, serão elaborados artigos visando congressos e revistas científicas relacionados com a área de pesquisa. O intuito é apresentar e expor os resultados alcançados aos olhares de outros pesquisadores.
7. **Redação da dissertação e defesa do mestrado.** Esta etapa compreende a elaboração do principal documento do programa de mestrado. Para a obtenção do título de mestre, faz-se necessária à escrita, submissão e defesa da dissertação perante uma comissão julgadora.

Tabela 4.3: Cronograma de atividades que compõem o projeto de pesquisa, o símbolo \checkmark representa as atividades finalizadas e o símbolo \circ , as atividades a desenvolver.

		Atividades por trimestre						
Período		1	2	3	4	5	6	7
2020	1º trimestre	\checkmark	\checkmark					
	2º trimestre			Paralisação COVID-19				
	3º trimestre			Paralisação COVID-19				
	4º trimestre	\checkmark	\checkmark		\checkmark	\checkmark		
2021	1º trimestre	\checkmark	\checkmark		\checkmark	\checkmark	\checkmark	
	2º trimestre	\checkmark	\checkmark		\checkmark	\checkmark	\checkmark	
	3º trimestre		\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	\checkmark	
	4º trimestre	\circ	\circ		\circ	\circ	\circ	
2022	1º trimestre		\circ		\circ	\circ	\circ	\circ
	2º trimestre						\circ	\circ

Capítulo 5

Resultados Preliminares

Neste capítulo são apresentados os resultados parciais obtidos considerando-se os cenários inicialmente modelados e as soluções de otimização até então propostas. Por fim, é apresentada uma consideração final desta pesquisa seguida da principal contribuição alcançada até o momento.

5.1 Configuração dos Experimentos

Para avaliar as soluções propostas foi modelado um cenário que apresenta o uso do CCOP Mv em apoio à uma operação de resgate na qual a infraestrutura de comunicação é inexistente. Tal cenário foi modelado com base na tragédia ocorrida em janeiro de 2019 em Brumadinho - MG. Para definição deste cenário foram distribuídos sobre o mapa da cidade de Brumadinho um conjunto de 200 pontos de demanda (marcadores azuis) e um conjunto de 50 possíveis locais de implantação dos nós de acesso (marcadores pretos), como apresentado na Figura 5.1. Cabe ressaltar que esta modelagem está sendo feita conforme apresentado na subseção 4.1.1 como um ponto de melhoria para esta obra. Além da dimensão de 200x50 do cenário de Brumadinho, modelou-se mais dois cenários com as seguintes dimensões 800x400 e 3000x400. Os cenários representam o emprego do Exército Brasileiro em operação de combate no nível companhia, batalhão e brigada, respectivamente. A Tabela 5.1 apresenta o conjunto de parâmetros utilizados no modelo de propagação de Okumura-Hata [25], em sua versão para ambientes rurais, para gerar as matrizes de adjacências e conectividades que são utilizadas como entrada no processo de otimização para gerar os resultados.

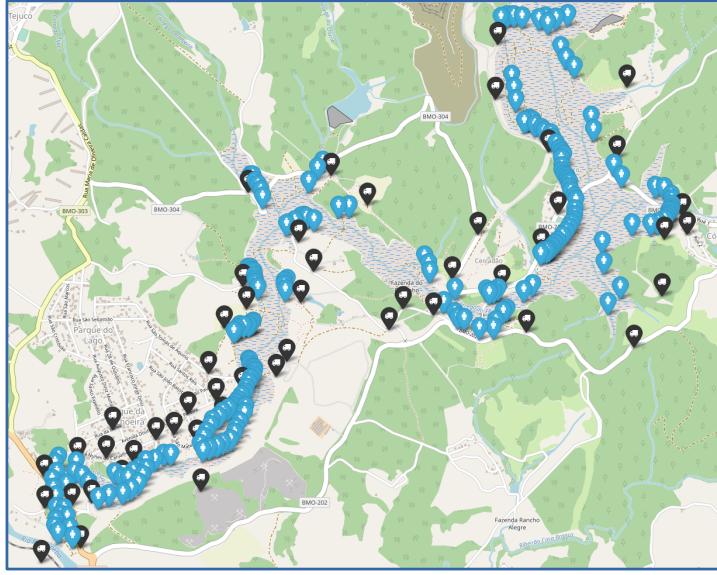


Figura 5.1: Cenário inicial modelado baseado na tragédia de Brumadinho-MG.

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados no cenário modelado.

Parâmetro	Valor padrão
Altura da antena de transmissão	10m
Altura das antenas de recepção	1,5m
Potência de transmissão	25dBm
Ganho da antena de transmissão	13dBi
Frequência do canal	700MHz
Dimensão dos cenários	200x50, 800x400 ² e 3000x400 ²
Raio de cobertura ¹	2Km
Execuções	200

¹Requisito Operacional do projeto CCOP Mv.

²Cenários Sintéticos.

5.2 Métricas Avaliadas

O tempo de processamento, aptidão e convergência foram as métricas utilizadas para análise dos experimentos. O tempo de processamento e a convergência revelam a velocidade com que as soluções entregam os resultados sendo fundamental para verificação da adequabilidade das soluções em cenários reais. Enquanto a aptidão expressa a qualidade dos resultados obtidos. Para aferição da velocidade foram avaliados o tempo de processamento de 78 gerações. A convergência foi avaliada pela aptidão fornecida em cada geração. Já para medir a aptidão foi avaliada a porcentagem relativa de desvio (PRD) dada pela Equação 5.1:

$$PRD = \frac{(\text{Ótima} - \text{melhor Aptidão})}{\text{Ótima}} * 100. \quad (5.1)$$

Os experimentos foram agrupados por fatores a serem avaliados. Para isso, foram realizados três grupos de testes: (*i*) com variação dos métodos de seleção; (*ii*) com variação dos métodos de reprodução; e (*iii*) com variação dos métodos de mutação. Os experimentos foram executados em uma máquina com as seguintes configurações: Intel i5 3300 3.2GHz, *quad-core*, com 16 GB RAM DDR3.

5.3 Resultados Obtidos

Na Figura 5.2, é apresentada a avaliação de desempenho das soluções otimizadas com a variação dos métodos de seleção. Utilizando como referência o resultado ótimo que o E-ALLOCATOR obteve, nota-se que o tempo de convergência do M-ALLOCATOR com o método EE possui maior velocidade de aproximação, seguido pelo Tr e To, Figura 5.2a. Isso ocorre pois o EE retira os piores indivíduos e substitui por outros indivíduos gerados, tornando o processo mais adaptado para a lista que compõe os candidatos. Isso é ratificado pela métrica aptidão (Figura 5.2b) e tempo de processamento (Figura 5.2c) que além de possuir uma amplitude interquartil menor, possui uma mediana ligeiramente melhor quando comparado com outros métodos de seleção do M-ALLOCATOR.

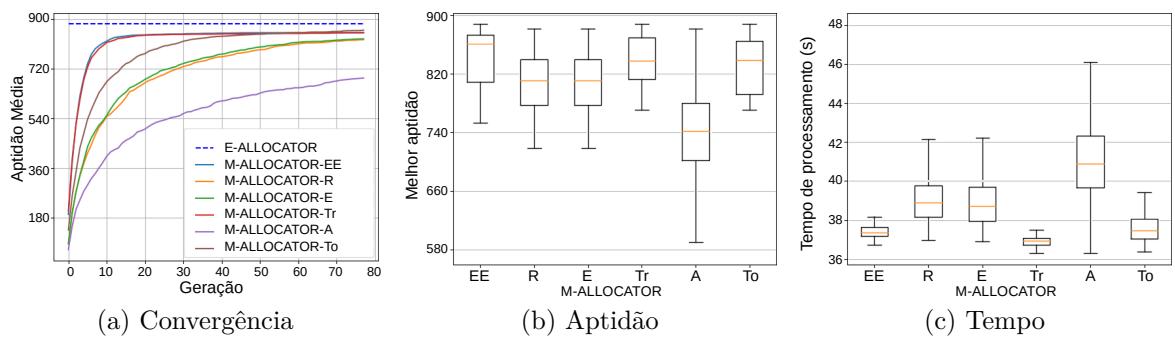


Figura 5.2: Impacto de desempenho com a variação dos métodos de seleção.

Após explorar os métodos de seleção nas soluções otimizadas, explorou-se os métodos de reprodução, como apresentado na Figura 5.3. Na Figura 5.3a, observa-se que independente da quantidade de geração, o M-ALLOCATOR com o método DP é o método de reprodução mais eficaz, tendo como base a solução ótima (*i.e.*, E-ALLOCATOR). Isso faz sentido haja vista que o DP explora regiões próximas dos indivíduos, adicionando novas informações a cada geração. Em razão disso, há uma aptidão melhor (Figura 5.3b) com um menor tempo de processamento (Figura 5.3c).

Em relação ao método de mutação, observa-se que há uma convergência mais rápida do M-ALLOCATOR ao usar o método de EM, aproximando-se da solução exata à medida

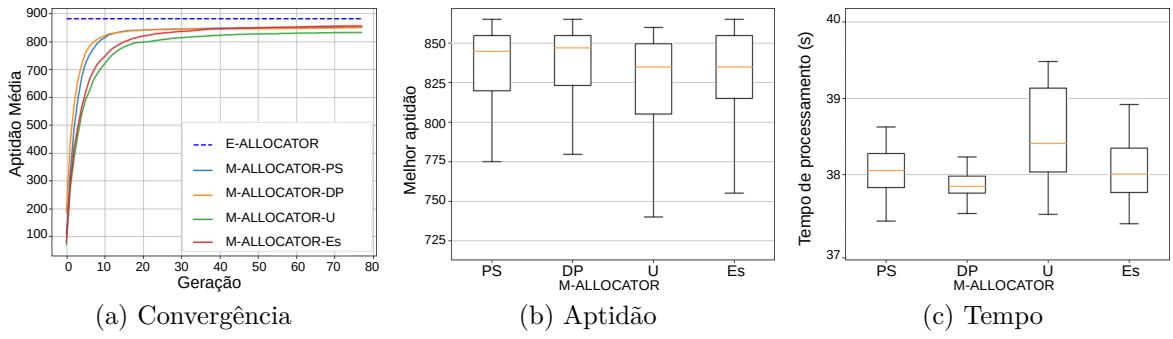


Figura 5.3: Impacto de desempenho com a variação dos métodos de reprodução.

que a quantidade de geração aumenta. Além disso, vale frisar que não há uma diferença na métrica aptidão e tempo de processamento ao usar os métodos EM e I.

Como observação da definição do problema, destaca-se que dentre as restrições apresentadas na modelagem do problema, observou-se que a Restrição 4.4 gerou mais impacto nos resultados obtidos, independente dos métodos utilizados para avaliação. Isso ocorre devido à restrição impor que os nós de acesso sejam distribuídos em *clusters*. Isso aumenta a interferência co-canais entre as células, além de reduzir a área de cobertura do sistema e o número de clientes atendidos. Entretanto, destaca-se que o E-ALLOCATOR é adequado quando há baixa carga de trabalho, enquanto o M-ALLOCATOR é adequado para os cenários com alta carga de trabalho. Ainda, M-ALLOCATOR fornece soluções quase ótimas dentro do tempo computacional adequado para todas as instâncias do problema, como apresentado na Tabela 5.2.

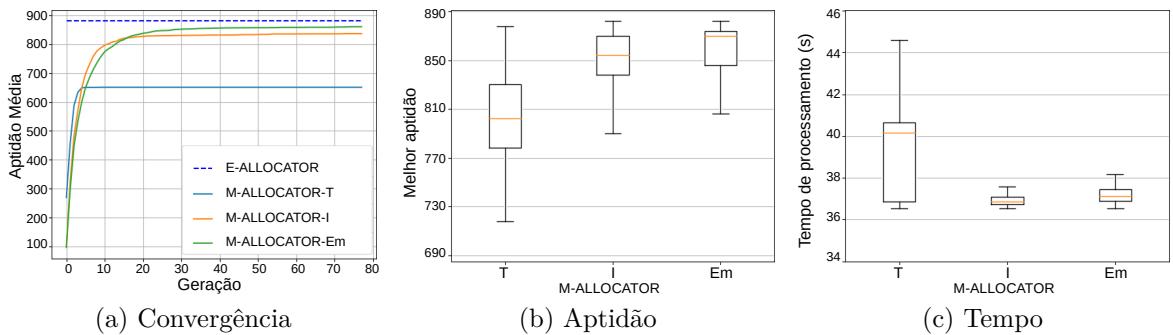


Figura 5.4: Impacto de desempenho com a variação dos métodos de mutação.

5.4 Considerações Finais

Com o desenvolvimento desta pesquisa, tem-se o intuito de contribuir para a área de sistemas de apoio à decisão e em particular com o desenvolvimento do Projeto do Centro

Tabela 5.2: Desempenho das soluções otimizadas (Média \pm IC de 95%).

Cenário	E-ALLOCATOR		M-ALLOCATOR-EE/DP/Em		
	Tempo (s)	Objetivo	Tempo (s)	Objetivo	PRD
200x50	0,62 \pm 0,0304	876 \pm 0	38,09 \pm 0,2607	817,81 \pm 3,8728	7,12 \pm 0,51
800x400	>3dias	-	587,39 \pm 9,2118	1746,83 \pm 14,7703	-
3000x400	>7dias	-	1497,21 \pm 23,4666	6100,40 \pm 118,7256	-

de Coordenação de Operações Móvel do Exército Brasileiro mediante o serviço proposto nesta Dissertação. Nesse sentido, espera-se que esta dissertação supere as limitações das soluções atuais encontradas na literatura. Ainda, espera-se também que o serviço proposto seja realmente útil para emprego na prática e apresente resultados satisfatórios em termos de tempo de processamento, de qualidade e confiabilidade dos resultados alcançados. Durante esse caminho, serão investigados os detalhes necessários para que este trabalho seja bem sucedido, objetivando produzir resultados científicos de impacto na comunidade científica nacional e internacional. Com esse intuito, realizou-se uma fundamentação teórico sobre programação linear, sobre as técnicas de otimização e sobre o escopo da otimização proposta que é a infraestrutura de uma rede de telefonia de 4^a Geração - 4G/LTE, além dos modelos de predição de sinal RF e das especificações propostas pelo 3GPP. Em seguida, foi feita uma revisão da literatura que além de investigar o estado da arte na área de sistemas de apoio à decisão na solução do problema MCLP, teve como objetivo identificar lacunas para este projeto de pesquisa. Em razão disso, esta Dissertação apresentou a proposta de um serviço de apoio à decisão para determinação do menor número de eNodeBs e respectivas localizações para maximização da área de cobertura do CCOp Mv. Os resultados parciais obtidos permitiram demonstrar que há a possibilidade de alcançar resultados ótimos ou quase ótimos num tempo computacionalmente adequado ao serviço proposto. A seguir é apresentada a produção científica geradas até o momento com este projeto de pesquisa.

5.5 Produção Científica e Atual Contribuição

Até o presente momento, esta pesquisa obteve uma publicação no XXVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços - WGRS, a qual foi premiada com uma **Menção Honrosa**, sendo ela:

- **ANTUNES, E. O. ; F.CAETANO, M. ; MAROTTA, M. A. ; ARAUJO, A. ; BONDAN, L. ; MENEGUETE, RODOLFO I. ; ROCHA FILHO, GERALDO P..** “Soluções Otimizadas para o Problema de Localização de Máxima Cobertura em Redes Militarizadas 4G/LTE”. In: XXVI Workshop de Gerência e Operação de Redes e Serviços (WGRS), 2021, Evento Online.

- É valido salientar que há um convite para submeter uma versão estendida do trabalho para o *IEEE Transactions on Network and Service Management* (TNSM), Qualis A2, Fator de Impacto 4.195.

Referências

- [1] Sobrapo: *O que é pesquisa operacional?* <https://www.sobrapo.org.br/o-que-e-pesquisa-operacional>, 2021. acessado em 12/09/2021. vii, 4, 5
- [2] Mathar, Rudolf e Thomas Niessen: *Optimum positioning of base stations for cellular radio networks.* Wireless Networks, 6(6):421–428, 2000. 2
- [3] Rappaport, Theodore S *et al.*: *Wireless communications: principles and practice*, volume 2. Prentice Hall PTR New Jersey, 1996. 2, 25
- [4] Church, Richard e Charles ReVelle: *The maximal covering location problem.* Em *Papers of the regional science association*, volume 32, páginas 101–118. Springer-Verlag, 1974. 2
- [5] Mehboob, Usama, Junaid Qadir, Salman Ali e Athanasios Vasilakos: *Genetic algorithms in wireless networking: techniques, applications, and issues.* Soft Computing, 20(6):2467–2501, 2016. 3
- [6] Atta, Soumen, Priya Ranjan Sinha Mahapatra e Anirban Mukhopadhyay: *Solving maximal covering location problem using genetic algorithm with local refinement.* Soft Computing, 22(12):3891–3906, 2018. 3, 15, 17
- [7] Bagherinejad, Jafar e Mahnaz Shoeib: *Dynamic capacitated maximal covering location problem by considering dynamic capacity.* International Journal of Industrial Engineering Computations, 9(2):249–264, 2018. 3, 15, 17
- [8] Seda, Pavel, Milos Seda e Jiri Hosek: *On mathematical modelling of automated coverage optimization in wireless 5g and beyond deployments.* Applied Sciences, 10(24):8853, 2020. 3, 16, 17
- [9] Gazani, M e S Niaki: *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, 2021. 3, 17
- [10] Costa, Vinícius Oliveira: *Alocação de antenas para rede celular de 4g utilizando algoritmos meméticos.* Dissertação de Mestrado, 2016. 3, 15, 17
- [11] Yang, Pei, Yiyong Xiao, Yue Zhang, Shenghan Zhou, Jun Yang e Yuchun Xu: *The continuous maximal covering location problem in large-scale natural disaster rescue scenes.* Computers & Industrial Engineering, 146:106608, 2020. 3, 16, 17, 33

- [12] Farahani, Reza Zanjirani, Nasrin Asgari, Nooshin Heidari, Mahtab Hosseiniinia e Mark Goh: *Covering problems in facility location: A review*. Computers & Industrial Engineering, 62(1):368–407, 2012. 3
- [13] Alizadeh, Roghayyeh, Tatsushi Nishi, Jafar Bagherinejad e Mahdi Bashiri: *Multi-period maximal covering location problem with capacitated facilities and modules for natural disaster relief services*. Applied Sciences, 11(1):397, 2021. 3, 17
- [14] Barbosa, Marcos Antonio e Ricardo Alexandre D Zanardini: *Iniciação à pesquisa operacional no ambiente de gestão*. 2015. 4, 6, 7
- [15] Lachtermacher, G.: *Pesquisa Operacional na tomada de decisões: modelagem em Excel*. 4^a Edição. Rio de Janeiro. Elsevier, 2009. 5
- [16] Taha, Hamdy A: *Pesquisa Operacional*. 8^a Edição. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008. 6
- [17] Andrade, E. L.: *Introdução à Pesquisa Operacional: métodos e modelos para análise de decisões*. 4^a Edição. Rio de Janeiro. LTC, 2009. 6
- [18] Arenales, Marcos, Vinícius Armentano *et al.*: *Pesquisa operacional*. Elsevier Brasil, 2015, ISBN 978-85-352-7161-4. 6, 7
- [19] Scholarpedia: *Metaheuristics*. <http://scholarpedia.org/article/Metaheuristics>, 2021. acessado em 12/09/2021. 9
- [20] Sverzut, José Umberto: *Redes GSM, GPRS, EDGE e UMTS: Evolução a Caminho da Quarta Geração (4G)*. 4^a Edição. São Paulo. Érica, 2015, ISBN 978-85-365-2206-7. 10
- [21] Vallejo-Mora, Ana Belen, Matías Toril, Salvador Luna-Ramírez, Miguel Regueira e Salvador Pedraza: *Analytical model for estimating the impact of changing the nominal power parameter in lte*. Mobile Information Systems, 2018, 2018. 15, 17
- [22] García, Antonio J, Víctor Buenestado, Matías Toril, Salvador Luna-Ramírez e JM Ruiz: *A geometric method for estimating the nominal cell range in cellular networks*. Mobile Information Systems, 2018, 2018. 16, 17
- [23] Ghosh, Arijeet, Iti Saha Misra e Anindita Kundu: *Coverage and rate analysis in two-tier heterogeneous networks under suburban and urban scenarios*. Transactions on Emerging Telecommunications Technologies, 30(12):e3648, 2019. 16, 17
- [24] Grochla, Krzysztof e Mariusz Slabicki: *Transmit power optimisation in cellular networks with nomadic base stations*. IET Communications, 13(18):3068–3074, 2019. 16, 17
- [25] Seybold, John S: *Introduction to RF propagation*. John Wiley & Sons, 2005. 21, 36
- [26] 3GPP: *Technical report tr-36.814 v 9.2.0*. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.814/36814-920.zip, 2017. acessado em 29/08/2021. 21, 25

- [27] 3GPP: *Technical report tr-36.872 v 12.1.0*. https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/36_series/36.872/36872-c10.zip, 2013. acessado em 29/08/2021. 21
- [28] Wikipédia: *Rompimento de barragem em brumadinho*. https://pt.wikipedia.org/wiki/Rompimento_de_barragem_em_Brumadinho, 2021. acessado em 29/08/2021. 21
- [29] Dipol: *Does outdoor antenna increase the speed of lte?* https://www.dipolnet.com/does_outdoor_antenna_increase_the_speed_of_lte__bib532.htm. acessado em 18/06/2021. 25
- [30] Telkonika: *Mobile signal strength recommendations*. https://wiki.teltonika-networks.com/view/Mobile_Signal_Strength_Recommendations, 2020. acessado em 10/09/2021. 25
- [31] Bergstra, James, Daniel Yamins e David Cox: *Making a science of model search: Hyperparameter optimization in hundreds of dimensions for vision architectures*. Em *International conference on machine learning*, páginas 115–123. PMLR, 2013. 32