

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE FORMAÇÃO DE OFICIAIS

UBIRATAN SOUZA DE ARAÚJO

**APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR COMO FERRAMENTA AUXILIAR NA
DETERMINAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DOS QUARTÉIS DO CORPO DE
BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO**

São Luís
2020

UBIRATAN SOUZA DE ARAÚJO

**APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR COMO FERRAMENTA AUXILIAR NA
DETERMINAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DOS QUARTÉIS DO CORPO DE
BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Formação de Oficiais - CBMMA da Universidade Estadual do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Segurança Pública do Trabalho.

Orientador: Prof. Dr. Moisés dos Santos Rocha

São Luís
2020

Araújo, Ubiratan Souza de.

Aplicação de programação linear como ferramenta auxiliar na determinação da localização dos quartéis do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão / Ubiratan Souza de Araújo. – São Luís, 2020.

54 f

Monografia (Graduação) – Curso de Segurança Pública do Trabalho, Universidade Estadual do Maranhão, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Moisés dos Santos Rocha.

1.Pesquisa operacional. 2.Localização de facilidades. 3.Modelo pmediana. 4.Corpo de Bombeiros Militar. I.Título

CDU: 519.8:355.221(812.1)

UBIRATAN SOUZA DE ARAÚJO

**APLICAÇÃO DE PROGRAMAÇÃO LINEAR COMO FERRAMENTA AUXILIAR NA
DETERMINAÇÃO DA LOCALIZAÇÃO DOS QUARTÉIS DO CORPO DE
BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO**

Monografia apresentada junto ao Curso de Formação de Oficiais - CBMMA da Universidade Estadual do Maranhão para obtenção de grau de Bacharel em Segurança Pública do Trabalho.

Aprovado em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Moisés dos Santos Rocha (Orientador)

Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Msc. Abraão Ramos da Silva (Membro)

Mestre em Logística e Pesquisa Operacional
Universidade Estadual do Maranhão

Ariosvaldo Campos da Silva Junior - Major QOCBM (Membro)

Comandante da 2º CIBM
Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão

A Deus todo poderoso e a minha esposa
Emmanoelle Araújo pelo incentivo e
compreensão nos momentos de ausência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, que me rege e me guarda neste universo.

Agradeço à minha esposa Emmanoelle Araújo, que não mediu esforços para que meu sonho fosse realizado, tornando possível a sua concretização e enchendo de alegria e amor o meu coração que bate mais forte junto a ela.

Sou grato aos meus pais que me apoiaram muito com palavras de incentivo, ligações incessantes de carinho e presença fundamental nos momentos difíceis.

Agradeço a minha irmã Tassiana Araújo, que caminhou junto comigo durante o curso, sempre alegre e contente ao dividirmos o peso desta armadura.

Agradeço aos oficiais da ABMJM e instrutores que se privaram do conforto de suas residências para contribuir ao meu aprendizado. Em especial ao Sr. 1º Tenente Wtson, ao Sr. 1º Tenente Calisto e ao Sr. 1º Tenente Brício, que são exemplos profissionais e proporcionaram momentos únicos a minha turma durante as instruções.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Moisés Rocha, que não mediu esforços em contribuir para o meu aprendizado e me incentivar a buscar mais e mais o conhecimento tão necessário para agregar à minha carreira.

Aos funcionários da UEMA, pela amizade e colaboração na realização deste trabalho.

E, não menos importante, à 12ª Turma do CFOBM, pela amizade, apoio, acolhida e alegria nos momentos mais estressantes do curso.

“Um exército de cervos comandado por um leão é muito mais temível que um exército de leões comandado por um cervo.”

Plutarco

RESUMO

Nos serviços prestados pelo Corpo de Bombeiros Militar estão inclusos resposta a desastres naturais, incidentes com materiais perigosos, resgate técnico e atendimento pré-hospitalar, tendo uma demanda que aumenta constantemente. Os gestores são desafiados a equilibrar as expectativas de serviço ao cidadão com recursos orçamentários que exigem uma sólida assistência técnica para avaliar o impacto do aumento de unidades de quartéis necessários. O presente trabalho buscou implementar o modelo da p-mediana, que utiliza de programação binária, para localizar as unidades do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão e assim diminuir os custos operacionais e garantir o menor tempo de atendimento ao cidadão. Esta pesquisa é de natureza descritiva e aplicada, assume forma de revisão bibliográfica e restringe o assunto a localização de facilidades, adotando algumas etapas para se atingir o objetivo, sendo elas, de coleta de dados de distância entre municípios para elaboração de matriz, elaboração e cálculo de equações lineares e utilização de software aplicado para obter solução ótima do modelo. Foi utilizado, como exemplo prático, a região do Comando Operacional da Área VI do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão, definida na Lei 10.230 de 23 de abril de 2015, sendo extraído destes municípios a matriz de distância, que foi ponderada com o índice de ocorrências anuais, calculada através do histórico de chamados de ocorrências dos estados limítrofes. Sendo assim, a simulação efetuada procurou estabelecer a abertura ordenada e gradual de até cinco unidades de quartéis, utilizando como restrições o atendimento ilimitado e zoneado. A Pesquisa Operacional ofereceu suporte para demonstrar que o modelo da p-mediana é eficaz, reduzindo em até vinte por cento os custos operacionais para cada unidade instalada. Ficou evidenciado que a instituição possui capacidade de avaliar o seu planejamento operacional e como as mudanças no posicionamento dos recursos irão afetar os resultados de resposta à comunidade e, sendo assim, servir como ferramenta auxiliar para influenciar a tomada de decisão pelos gestores do Estado. O modelo também tem potencial para ser utilizado na localização dos postos de bombeiros que abrem esporadicamente para Operações de Prevenção, como em praias durante as férias, períodos de secas para prevenção de queimadas e datas comemorativas como Carnaval e São João.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional. Localização de facilidades. Modelo p-mediana. Corpo de Bombeiros Militar.

ABSTRACT

The services provided by the Military Fire Brigade include response to natural disasters, incidents with hazardous materials, technical rescue and pre-hospital care, with a demand that increases constantly. Managers are challenged to balance expectations of service to citizens with budgetary resources that require solid technical assistance to evaluate the impact of the increase in necessary barracks. The present work sought to implement the p-median model, which uses full binary programming, to locate the units of the Maranhão Military Fire Brigade to reduce operating costs and ensure the shortest service time for citizens. This is a descriptive and applied research, takes the form of a bibliographic review and restricts the subject to the location of facilities, adopting some steps to achieve the objective, from the collection of distance data between counties for the elaboration of matrix, elaboration and calculation of linear equations and the use of applied software to obtain an optimal solution for the model. As an example of application of the proposed model for locating facilities, the VI Operational Command Region, defined in Law 10.230 of April 23, 2015, extracting from these counties the matrix of distance, which was weighted with the index of annual occurrences, calculated through history of calls for occurrences of the bordering states of Maranhão. Thus, the simulation sought to establish the orderly and gradual opening of up to five fire station units, using as restrictions unlimited and zoned service. The Operational Research demonstrated that the p-median model is effective, reducing operating costs by up to twenty percent for each installed unit. It was evidenced that the institution has the capacity to evaluate its operational planning and how changes in the resources positioning will affect the results in response to the community and, therefore, to serve as an auxiliary tool to influence decision making by State managers. The model also has the potential to be used locating fire stations that open on occasion for Prevention Operations, such as beaches during holidays, periods of drought to prevent burning and holidays such as Carnival and São João.

Keywords: Operational Research. Location of facilities. p-median model. Military Fire Department.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
2	OBJETIVOS	11
2.1	Geral	11
2.2	Específicos.....	11
3	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	12
3.1	Caracterização da pesquisa.....	12
3.2	Método de pesquisa.....	14
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
4.1	Pesquisa Operacional	16
4.2	Histórico	16
4.3	Áreas de aplicação	17
4.4	Processo de construção de modelos	18
4.5	Ferramentas.....	20
4.6	Modelos determinísticos	22
4.7	Modelos estocásticos.....	24
4.8	Algoritmo simplex e branch-and-bound.....	25
5	MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR UTILIZADOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES.....	27
5.1	O modelo p-mediana	29
5.2	Modelo p-mediana adaptado para serviços de emergência.....	30
6	APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO AO CBMMA	34
6.1	Formulação do problema	35
6.2	O funcionamento do ciclo operacional	35
6.3	Função objetivo.....	36
6.4	Restrições	39
6.5	Modelo Computacional	40
7	RESULTADOS	41
8	CONCLUSÃO.....	44
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICE A – MATRIZ DE DISTÂNCIA [d_{ij}].....	49
	APÊNDICE B – EQUAÇÕES LINEARES DO PROGRAMA LP_SOLVE.	50
	ANEXO A – MAPA DOS MUNICÍPIOS ATENDIDOS PELO COCB-VI	53

1 INTRODUÇÃO

A seleção do local para a implantação de uma empresa, fábrica ou depósito de produtos é uma decisão ligada à estratégia empresarial. Para os serviços públicos o desafio é fornecer para a população uma qualidade de atendimento, custo satisfatório e cobertura integral. Sabe-se que os custos para se manter as instituições públicas são consideráveis e o agravamento da situação financeira em quase todos os níveis de administração pública tem ocasionado diminuição dos investimentos para estes setores, com a consequente redução, na maioria dos casos, da qualidade dos serviços oferecidos. Os custos de um serviço insatisfatório se estendem além dos custos monetários, incorporando muitos custos sociais de difícil medição.

O Corpo de Bombeiros Militar, a Polícia Militar e as Ambulâncias do Sistema de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) são serviços públicos disponíveis em muitos municípios para prover aos cidadãos um rápido sistema de atendimento em situações de emergência/urgência. Países desenvolvidos na área de segurança dispõem de planos para a distribuição das unidades de atendimento emergencial de modo a cobrir de maneira relativamente uniforme toda a área onde existam concentrações humanas.

O Brasil possui postos de bombeiros em 14,51% dos seus municípios, sendo que dos 26 estados e do Distrito Federal o índice é ligeiramente superior ao apurado em 2012, quando o serviço foi identificado em 14,08% das cidades brasileiras. A região onde há maior presença física dos bombeiros é a Sul, com 27,12%. Na sequência, aparece o Centro-Oeste (16,48%), seguido pelo Sudeste (15,4%), Norte (12,67%) e Nordeste (5,24%). Os percentuais refletem a contabilização dos dados enviados pelas próprias corporações, de maneira individual (Cenário de Emergência / Bombeiros do Brasil, 2014, p. 1)

Diante do exposto é necessário que sejam estudadas alternativas e concebidas proposições de soluções para elevar o nível dos serviços de atendimento emergencial. Entendendo a defasagem de unidades de Bombeiros Militares nos municípios e com o intuito de empregar da melhor maneira possível os recursos disponíveis, será utilizado a Pesquisa Operacional (PO) para encontrar o melhor caminho para solucionar os problemas de localização destas unidades.

Como o próprio nome indica, a pesquisa operacional envolve 'pesquisa sobre operações'. Portanto, a pesquisa operacional é aplicada a problemas envolvendo como conduzir e coordenar as operações (isto é, as atividades) em uma organização. A natureza das organizações é essencialmente secundária e, de fato, a PO tem sido largamente aplicada em áreas tão distintas como manufatura, transportes, construção, telecomunicações, planejamento financeiro, assistência médica, militar e serviços públicos,

somente para citar algumas. Portanto, a gama de aplicações é excepcionalmente grande. (HILLIER e LIEBERMAN, 2006, p. 23).

A natureza dos serviços do Corpo de Bombeiros Militar é de combate ao fogo, atendimento pré-hospitalar, busca e salvamento, todos relacionados com risco de morte e em alguns casos a prejuízos materiais apreciáveis para a sociedade em casos de falhas graves. Para tais serviços de atendimento, “a formulação tradicional de Pesquisa Operacional, de obter a solução ótima que minimiza os custos globais, não satisfaz”, conforme enfatiza (SOUZA, 1996).

Para o Corpo de Bombeiros Militar a decisão sobre qual cidade instalar um quartel é tarefa importante para determinar a qualidade de atendimento que será ofertado. Para uma decisão adequada quanto à localização deve-se determinar qual a capacidade ofertada, onde e quando será necessário o atendimento. Uma análise adequada deve considerar a forma de medir a capacidade, determinar a demanda para os próximos anos e decidir qual a capacidade a instalar. A análise deve incluir o desenvolvimento e a avaliação de alternativas para a tomada de decisão (MARTINS e LAUGENI, 2005).

Após resolver sobre os critérios importantes para a localização dos quartéis, a próxima fase é reformular esse problema de uma forma que seja conveniente para análise. Para Hillier e Lieberman (2006) o método de PO convencional é o de construir um modelo matemático que represente a essência do problema. Um tipo particularmente importante é o modelo de programação linear, em que as funções matemáticas que aparecem tanto na função objetivo quanto nas restrições são funções lineares.

Este trabalho apresentará o modelo da p-mediana para a localização de serviços de emergência desenvolvido por Souza (1996), os fatores que influenciam e os critérios que devem ser adotados para prestação de serviço de emergência pelo Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão, levando em consideração a necessidade de expansão das suas unidades pelo estado para atender todos os cidadãos a um nível aceitável de cobertura, qualidade e desempenho.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Aplicação de modelagem matemática como ferramenta auxiliar para a identificação dos municípios ideais para a instalação de quartéis do Corpo de Bombeiros Militar que proporcione, ao menor custo possível, o atendimento emergencial, privilegiando os locais com maior incidência de chamados.

2.2 Específicos

- ✓ Identificar o conjunto de cidades com potencial para instalação de quartéis do CBMMA;
- ✓ Selecionar o modelo de programação linear adequado para identificar as cidades em que devem ser instalados os quartéis do CBMMA;
- ✓ Desenvolvimento da instância do problema de programação linear selecionado para realização do planejamento da operação dos serviços emergenciais;
- ✓ Solucionar o problema através de um software apropriado.

3 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

3.1 Caracterização da pesquisa

Para a compreensão do problema apresentado serão apresentados métodos que orientarão o projeto de pesquisa proposto a partir da utilização de procedimentos adequados ao meio científico, garantindo dados fidedignos, que servem para promover a pesquisa acadêmica.

Como toda atividade racional e sistemática, a pesquisa exige que as ações desenvolvidas ao longo do seu processo sejam efetivamente planejadas. De modo geral, concebe-se o planejamento como a primeira fase da pesquisa, que envolve a formulação do problema, a especificação de seus objetivos, a construção de hipóteses, a operacionalização dos conceitos etc. (GIL, 2002, p. 19)

Portanto, os métodos adequados à pesquisa serão levantados, evitando assim problemas futuros e inconsistências que possam prejudicar o andamento adequado deste trabalho. Conforme Gil (2002), a elaboração de um projeto depende da sua natureza, do problema claramente formulado, objetivos bem determinados e um plano de análise e coleta de dados.

a) Quanto a natureza

O trabalho caracteriza-se conforme Marconi e Lakatos (2002) por ser descritivo, quando procura descrever sistematicamente uma área de interesse, ou fenômeno, mas, também, pode ser caracterizado como uma exploração técnica, sistemática e exata. Explana ainda que o pesquisador, baseando-se em conhecimentos teóricos anteriores, planeja cuidadosamente o método a ser utilizado, formula problema e hipóteses, registra sistematicamente os dados e os analisa com a maior exatidão possível. É também do tipo Pesquisa Aplicada por seu interesse prático, sendo os resultados aplicados imediatamente na solução de problemas da realidade.

b) Quanto aos objetivos

De acordo com Silva e Menezes (2001) esta proposta pode ser classificada como uma pesquisa exploratória, pois busca elevar a “familiaridade do pesquisador com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses”, assumindo forma de pesquisa bibliográfica.

c) Delimitação da pesquisa

Conforme ensina em Marconi e Lakatos (2002), para estabelecer limites para esta pesquisa ela será limitada ao assunto, por restringir-se a um tópico para impedir que se torne ou muito extenso ou muito complexo. Da matéria de Pesquisa Operacional, que deriva da administração ou engenharia de produção, será abordado apenas os modelos de localização de facilidades, sendo abordada as variáveis que este trabalho julga necessária para execução da atividade fim do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão.

d) Quanto aos procedimentos

O assunto será explorado através de uma Pesquisa Bibliográfica, extraíndo a maior quantidade de informações que se encontram disponíveis através dos autores da área de Pesquisa Operacional, que fornecerão uma gama de modelos para resolução do problema identificado na instituição. Servirá de apoio ainda a realização de Pesquisa Documental para elaboração de dados e informações necessários para o alcance dos objetivos.

O desenvolvimento da pesquisa documental segue os mesmos passos da pesquisa bibliográfica. Apenas cabe considerar que, enquanto na pesquisa bibliográfica as fontes são constituídas sobretudo por material impresso localizado nas bibliotecas, na pesquisa documental, as fontes são muito mais diversificadas e dispersas. Há, de um lado, os documentos 'de primeira mão', que não receberam nenhum tratamento analítico. Nesta categoria estão os documentos conservados em arquivos de órgãos públicos e instituições privadas, tais como associações científicas, igrejas, sindicatos, partidos políticos etc. Incluem-se aqui inúmeros outros documentos como cartas pessoais, diários, fotografias, gravações, memorandos, regulamentos, ofícios, boletins etc. (GIL, 2002, p. 46).

Conforme recomenda Marconi e Lakatos (2002) em linhas gerais a pesquisa irá realizar uma coleta documental dos dados e, que após esta etapa, serão classificados de forma sistemática, seguindo uma seleção, codificação e tabulação. A análise consistirá em uma interpretação, verificando as relações entre as variáveis, seguindo para uma breve explicação, discriminando as variáveis e contornando a validade da aplicação no modelo que será pré-estabelecido.

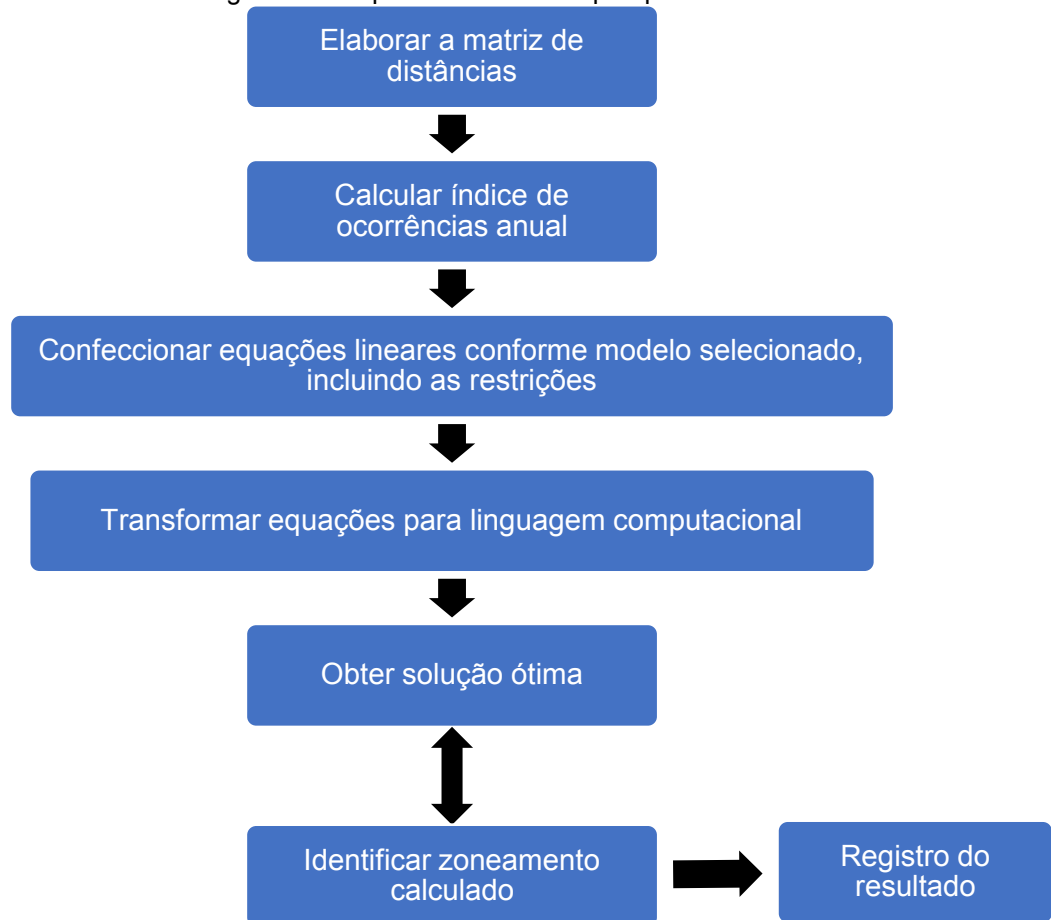
3.2 Método de pesquisa

As etapas abaixo foram sequenciadas para se atingir o objetivo proposto:

- 1) Etapa 01: Realizar o levantamento dos municípios da região selecionada no Estado, conforme distribuição da Lei de Organização Básica dos Corpos de Bombeiros do Estado do Maranhão, para coletar as distâncias rodoviárias entre eles, formando a matriz de distância.
- 2) Etapa 02: Confeccionar o índice de ocorrências anuais por habitante, conforme registros publicados pelos estados vizinhos, e ponderar na matriz de distância, obtendo assim a distância total percorrida entre cidades conforme o número de chamados calculados.
- 3) Etapa 03: Confeccionar as equações lineares, conforme método adotado para resolução do problema e das variáveis da hipótese, na linguagem de um software apropriado para iteração e análise combinatória.
- 4) Etapa 04: Análise dos resultados de solução ótima para várias quantidades de quartéis instalados, explanando o comportamento do acréscimo de quartéis conforme recomendações do modelo selecionado.
- 5) Etapa 05: Apresentação gráfica dos resultados calculados e a sequência a ser adotada para abertura de quartéis da região alvo do estudo.

No fluxograma da Figura 1 é detalhado o processo de desenvolvimento do estudo.

Figura 1 – Etapas do método de pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Pesquisa Operacional

Para Hillier e Lieberman (2006, p. 2) como o próprio nome indica, a PO envolve pesquisas sobre operações, sendo utilizada como fator de condução e coordenação das atividades de uma organização. O trecho Pesquisa é utilizado justamente por incluir o método científico para investigar um problema empresarial, utilizando assim um processo que começa formulando o problema, coletando dados, representando-o matematicamente e chegando a conclusões (soluções) obtidas do modelo que também são válidas para o problema real. Uma característica intrínseca da PO, considerada pelos tomadores de decisão como a mais importante, é que tende a encontrar uma melhor solução (solução ótima) para o problema considerado, não descartando as outras soluções encontradas. Note que o objetivo é encontrar o melhor caminho a seguir, buscando melhorar as práticas administrativas na busca da “otimalidade” corporativa.

4.2 Histórico

Para Fávaro e Belfiore (2013) “a consagração da PO como ferramenta organizada para decisão nas corporações foi na Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945)”. Foi para a solução de problemas de logística, tática e estratégia militar que a PO foi formalizada com a convocação de um grupo de cientistas para decidir como utilizar os recursos militares limitados de forma mais eficaz.

Após o final da guerra, a pesquisa operacional evoluiu rapidamente na Inglaterra e nos Estados Unidos. Em 1947, foi implantado o projeto SCOP (Scientific Computation of Optimal Programs) no Pentágono, com o objetivo de apoiar decisões de operações na força aérea americana. O projeto continha um grupo de pesquisa coordenado pelo economista Marshall Wood e pelo matemático George Dantzig. Durante este projeto, Dantzig desenvolveu, formalizou e testou o método simplex para resolver problemas de programação linear (otimização linear) (ARENALES, AMENTANO, et al., 2011, p. 1).

Segundo Arenales et al. (2011) antes de findar a década de 50 muitos cientistas motivaram-se em desenvolver pesquisas nesse campo, participaram de equipes de PO e evoluíram o estado da arte neste tema. É notável também a participação da revolução computacional para a PO, pois muitos avanços só foram

possíveis em tão pouco tempo após a resolução dos problemas de processamento do grande volume de cálculos.

Normalmente, fazer isso à mão seria uma hipótese fora de cogitação. Portanto, o desenvolvimento de computadores eletrônicos digitais, com a capacidade de realizarem cálculos matemáticos milhares ou até mesmo milhões de vezes mais rápido que o ser humano, deu um impulso enorme à PO. Outro estímulo veio nos anos 1980 com o desenvolvimento de computadores pessoais cada vez mais poderosos munidos de excelentes pacotes de software para emprego da PO. Isso permitiu que o emprego da PO ficasse ao alcance de um número muito maior de pessoas. Hoje em dia, praticamente milhões de pessoas têm pronto acesso a software de PO. Por conseguinte, enorme gama de computadores, de mainframes a laptops, é, hoje, rotineiramente utilizada para solucionar problemas relativos à PO (HILLIER e LIEBERMAN, 2006, p. 2).

Segundo Belfiore e Fávaro (2013), pode-se dizer que a PO utiliza o método científico (modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais) para a tomada de decisões. Sendo assim, a PO é recomendada para as áreas que envolvem equipes multidisciplinares como engenharia, matemática aplicada, ciência da computação e gestão de negócios.

4.3 Áreas de aplicação

A natureza da PO é estudar formas de atingir o bem-estar de toda a Organização. Entretanto, isso nem sempre é possível devido aos problemas se referirem a uma parte da Organização, que geralmente tem objetivos declarados genéricos. Para isso, os objetivos dos tomadores de decisões ao utilizar a PO são de resolver os problemas das porções da Instituição com um alinhamento aos objetivos mais altos da organização (HILLIER e LIEBERMAN, 2006)

A PO tem sido aplicada em áreas distintas desde o seu emprego na área militar. É observado a aplicação em construção, transporte, manufatura, serviços de emergência, serviço público, planejamento financeiro entre outros. Segundo Hillier e Lieberman (2006) a PO contribuiu de forma significativa para o aumento da produtividade das economias dos diversos países e pode-se observar a aplicabilidade real e consagrada nas diversificadas áreas da PO e organizações que a utilizam para melhoria, além da econômica, a de benefícios intangíveis, como pode-se observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Algumas aplicações da Pesquisa Operacional

ORGANIZAÇÃO	NATUREZA DA APLICAÇÃO	ANO DA PUBLICAÇÃO	Economia Anual (US\$)
United Airlines	Programar turnos de trabalho nos balcões de reserva para atender às necessidades dos clientes a um custo mínimo	1986	6 milhões
Citgo Petroleum Corp	Otimizar operações de refinarias e o abastecimento, a distribuição e o marketing de produtos.	1987	70 milhões
San Francisco Police Department	Programar e empregar de forma otimizada os patrulheiros por meio de um sistema computadorizado.	1989	11 milhões
Yellow Freight System, Inc.	Otimizar o desenho de uma rede nacional de transporte rodoviário e suas rotas	1992	17,3 milhões
Delta Airlines	Maximizar o lucro na alocação de tipos de aeronaves em mais de 2.500 voos domésticos.	1994	100 milhões
Proctor and Gamble	Redesenhar o sistema de distribuição e de produção nos Estados Unidos para reduzir custos e aumentar a velocidade de chegada ao mercado.	1997	200 milhões
Sears, Roebuck	Desenvolver um sistema de programação e rotas de veículos para as frotas de entrega e de atendimento domiciliar.	1999	42 milhões
Samsung Electronics	Desenvolver métodos de redução de tempos de fabricação e níveis de estoque.	2002	200 milhões a mais em receitas

Fonte: adaptado de Hillier e Lieberman (2006, p. 4).

Ainda segundo Hillier e Lieberman (2006) nem sempre importa a maximização dos lucros, mas sim os chamados lucros satisfatórios, pois dependem se a alta direção deseja (objetivo institucional) manter ou aumentar a sua fatia no mercado, manter preços estáveis, aumentar o prestígio, levantar o moral dos trabalhadores, manter o controle familiar do negócio etc. Há também considerações sociais distintas ao lucro, como meio ambiente, satisfação dos trabalhadores, qualidade dos produtos e demais práticas socialmente responsáveis.

4.4 Processo de construção de modelos

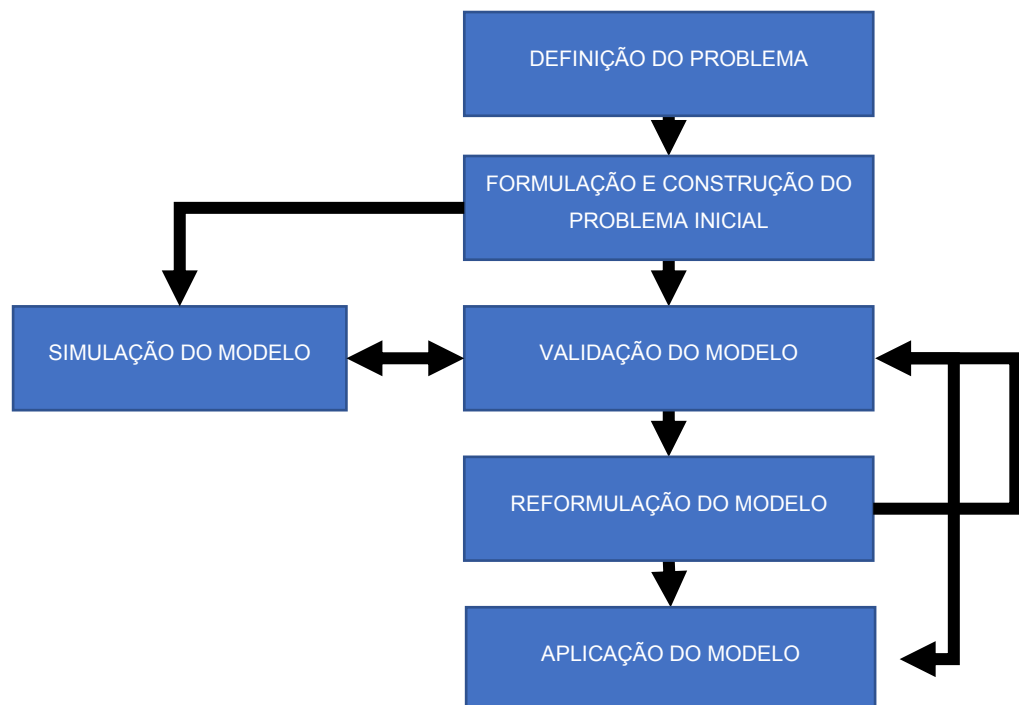
Para Goldbarg e Luna (2005) na busca de entender o mundo e o seu funcionamento é muito comum os homens criarem visões estruturadas da realidade, tentando esclarecer ou criar uma representação substitutiva da realidade, simulando-

a. Ainda pelo autor “Um modelo é um veículo para uma visão bem estruturada da realidade [...], visto, com os devidos cuidados, como uma representação substitutiva da realidade”. Um modelo não é igual a realidade, mas tão similar que se pode considerar após sua análise e/ou operação ser equivalente a realidade.

Segundo Hillier e Lieberman (2006) o método convencional de PO é o de construir um modelo matemático que representa a essência do problema, sendo que as expressões em formas de símbolos manipulam as variáveis de decisão, a função objetivo, as restrições e os parâmetros a serem desenvolvidos. Não existe então um único modelo correto, existe a representação do problema ao nível requerido para a tomada de decisão.

No processo de construção de modelos na ótica operacional é importante a definição clara do problema, sendo uma das fases mais importantes do processo de criação. Para isso Goldbarg e Luna (2005) esclarece que o problema deve ser traduzido em elementos palpáveis englobando: Objetivos, variáveis de decisão ou controle e níveis de detalhe, como mostra a Figura 2 abaixo:

Figura 2 – O processo de construção de modelos.



Fonte: Adaptado de Goldbarg e Luna (2005, p. 8).

De forma similar, mas com uma visão organizacional, Hillier e Lieberman (2006) esclarecem que a metodologia que deve ser utilizada por uma equipe de PO é conduzida pelas seguintes fases:

1. Definir o problema e iniciar a coleta dos dados;
2. Formular um modelo matemático representativo;
3. Desenvolver um procedimento computacional para auxiliar nas soluções possíveis do modelo;
4. Testar o modelo e aprimorá-lo;
5. Aplicação contínua da solução conforme prescrito pela gerência;
6. Implementar.

Note que a diferença entre os autores é a de utilizar um procedimento computacional para auxiliar nas soluções possíveis do modelo, reforçando a ideia de que o ferramental disponível, a depender do nível de dificuldade do problema, pode não ser suficiente para executar a simulação.

Ainda para Goldbarg e Luna (2005) os processos pouco rigorosos entram no processo de construção de modelos, saindo do formular matematicamente e quantitativamente, importando, de quem está modelando, a sua intuição, experiência, criatividade e poder de síntese, transformando a modelagem em uma arte. A lógica pode ser usada e isso determina padrões de modelagem que podem caminhar desde o óbvio até efeitos em que não se pode prever os resultados, como em procedimentos experimentais ou probabilísticos.

4.5 Ferramentas

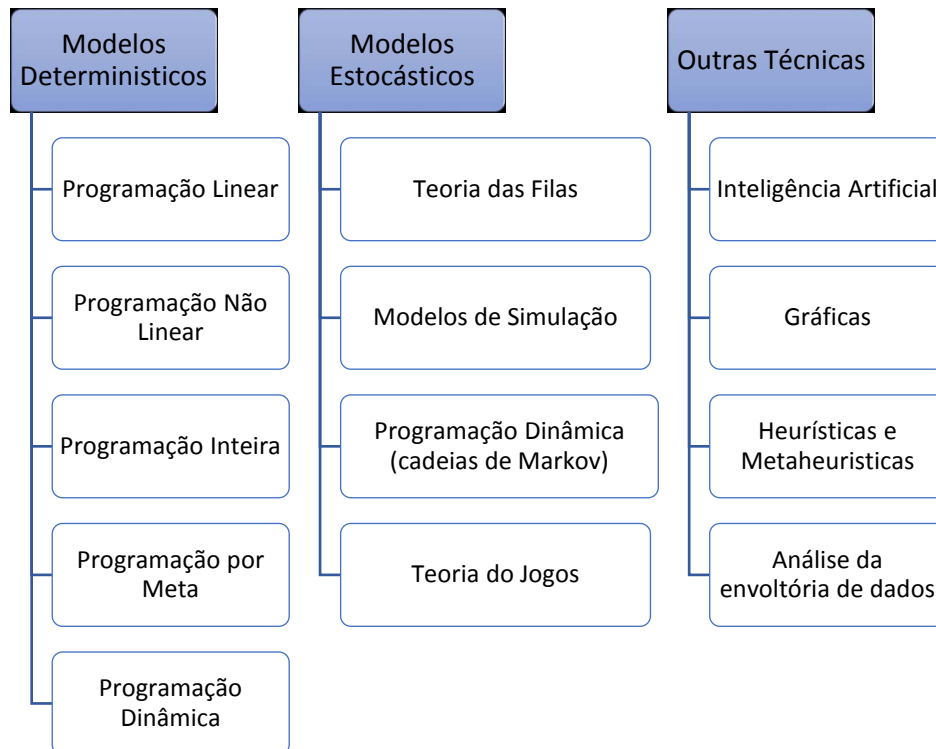
Para Goldbarg e Luna (2005) a Programação Matemática estrutura modelos de forma lógica e é amparada no ferramental matemático de representação (gráfica), buscando as melhores soluções. Apesar do nome “programação” ser associado a computação, ele é igualmente adequado para expressar as atividades genéricas de programação de atividades, sendo os recursos computacionais úteis para a solução dos modelos, pois são grandes os números de variáveis de decisões e restrições. O processo de modelagem pouco varia e as técnicas de soluções foram agrupadas em subáreas:

- Programação Linear (PL): usa modelos de programação com variáveis contínuas e que apresentam comportamento linear, tanto em relação às restrições como na função objetivo. Caso extremamente importante devido à eficiência dos algoritmos de solução existentes e à possibilidade da transformação dos modelos de Programação Não-linear em modelos de Programação Linear.
- Programação Não-linear: classificado assim se o modelo exibir qualquer tipo de não linearidade, seja na função objetivo ou nas restrições. Algoritmos eficientes podem resolver grandes problemas reais, principalmente de setores econômicos.
- Programação inteira: usa modelos em que algumas das variáveis assumem valores discretos, ou seja, não são contínuas. O requisito de que variáveis tenham de ser inteiras normalmente implica maior complexidade computacional do que a oriunda de situações de não linearidade de funções.

Segundo Hillier e Lieberman (2006) o modelo particularmente difundido é o de Programação Linear, que aplica funções lineares de representação do comportamento das variáveis e é classificado entre os mais importantes avanços científicos dos meados do século XX. Descreve o autor que o impacto desta ferramenta desde 1950 tem sido extraordinário e que hoje em dia é a ferramenta padrão que poupa milhares ou milhões de dólares para muitas empresas ou até mesmo negócios de tamanho moderado.

Como visto, sabe-se que na PO será elaborado um modelo do problema, uma simulação. Para resolução deste problema, que contemplará primeiramente uma equação matemática, faz-se o uso de ferramentas auxiliares que, devido à complexidade que se pode chegar os passos para resolução das equações/inequações matemáticas, podem tornar a solução trabalhosa ou inviável de ser executada de forma analítica ou gráfica. Segundo o trabalho de Eom e Kim (2006), que analisa, através de uma vasta pesquisa bibliográfica e criteriosa seleção de assuntos, os trabalhos publicados para suporte na tomada de decisão nos mais diversos setores das economias, pode-se classificar as ferramentas de PO utilizadas para solução dos problemas dos modelos conforme as técnicas e modelos sugeridos na Figura 3.

Figura 3 - Ferramentas de Pesquisa Operacional mais utilizadas.



Fonte: Adaptado de Eom e Kim (2006, p. 6).

4.6 Modelos determinísticos

Segundo Belfiore e Fávaro (2013) nestes modelos encontra-se formulações matemáticas em que as variáveis envolvidas são constantes e conhecidas. Neste caso existirá apenas uma solução exata, ou solução ótima, que será obtida da resolução de um sistema de equações/inequações. De modo geral há uma função objetivo representada na seguinte forma padrão:

Máximo ou Mínimo de $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Sujeito a:

$$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_1$$

$$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_2$$

$$\vdots \quad \quad \quad \vdots \quad \quad \quad \vdots$$

$$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \{ \leq, =, \geq \} b_m$$

$$(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0 \text{ (restrição de não negatividade)}$$

Onde:

x_j são as variáveis de decisão, $j = 1, 2, \dots, n$

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ é a função objetivo que contém as variáveis de decisão x_j .

$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n)$ representa as restrições que as variáveis de decisão podem possuir.

b_m é o termo independente que é uma constante para as restrições.

O problema padrão de programação linear também pode ser escrito de forma matricial: $\min f(x) = c x$

sujeito a:

$$A x = b$$

$$x \geq 0$$

em que:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}, c = [c_1, c_2, \dots, c_n]$$

Para os problemas em que se analisa o tipo das variáveis de decisão, estas podem ser inteiras, com números discretos, contínuos ou binários. Daí surgem os modelos de programação combinados às classificações de suas variáveis discretas. Em Belfiore e Fávaro (2013) é exposto as classificações possíveis e suas extensões, conforme apresentado na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Características dos modelos de PL e PNL e suas extensões.

Tipo de Modelo	Função Objetivo	Restrições	Tipo de Variável
Programação linear (PL)	Linear	Linear	Contínua
Programação linear inteira (PLI ou PI)	Linear	Linear	Discreta
Programação linear inteira mista (PLIM ou PIM)	Linear	Linear	Discreta e contínua
Programação linear binária (PLB ou PB)	Linear	Linear	Binária
Programação linear binária mista (PLBM ou PBM)	Linear	Linear	Binária e contínua
Programação linear inteira binária (PLIB ou PIB)	Linear	Linear	Discreta e binária

(Continua)

(Continuação)

Tipo de Modelo	Função Objetivo	Restrições	Tipo de Variável
Programação não linear (PNL)	Pelo menos uma delas é não linear		Contínua
Programação não linear inteira (PNLI)	Pelo menos uma delas é não linear		Discreta
Programação não linear inteira mista (PNLIM)	Pelo menos uma delas é não linear		Discreta e contínua
Programação não linear binária mista (PNLBM)	Pelo menos uma delas é não linear		Binária e contínua
Programação não linear inteira binária (PNLIB)	Pelo menos uma delas é não linear		Discreta e binária

Fonte: Belfiore e Fávaro (2013, p. 10).

Ainda nos modelos determinísticos tem-se modelos de programação mais complexos e que dependendo de sua aplicação são mais fáceis para visualização dos resultados ou economia computacional de cálculo, como por exemplo o modelo de Programação em Redes, utilizando grafos ou redes com nós e arcos de interligação, muito utilizado para solucionar problemas de transportes, transbordo, designação, caminho mínimo, fluxo máximo entre outros. Há Programação por Metas que busca diminuir os desvios de alguns objetivos especificados pelas chamadas variáveis de desvio. Finalizando, tem-se a Programação Dinâmica, em que a contagem do tempo avança e o problema inicial é dividido em subproblemas, descrevendo assim o estado do sistema em um dado momento, sendo as variáveis não aleatórias para tornar o problema determinístico. (BELFIORE e FÁVARO, 2013).

4.7 Modelos estocásticos

Para Belfiore e Fávaro (2013) neste tipo de modelagem existe uma característica operacional bem definida que é a utilização de funções de probabilidade, ou seja, pelo menos uma das variáveis do sistema é aleatória. A resolução destes modelos estocásticos é executada por meio da utilização de métodos numéricos (programas computacionais), gerando assim mais de uma solução, analisando diferentes cenários, não tendo assim uma solução ótima. Destacam-se nesses modelos:

- Teoria das filas: o estudo é em observar o comportamento das filas formadas através de análises matemáticas e encontrar assim uma solução para por exemplo, dimensionar o número de agências e seus *checkouts* em função de projeções de demanda;
- Modelos de simulação: utiliza-se técnicas numéricas para estudar o comportamento de sistemas reais ao variar parâmetros de entrada e comparar os resultados, orientando assim a tomada de decisão para os diversos cenários;
- Programação dinâmica estocástica: que varia da determinística por ter pelo menos uma variável aleatória;
- Teoria dos jogos: utiliza a decisão de um indivíduo para avaliar as possibilidades de decisão dos outros e vice-versa.

Há de destacar que outras técnicas estão sendo desenvolvidas e aprimoradas para serem adicionadas à PO. Isto é devido ao desenvolvimento computacional que está incluindo a inteligência artificial, heurística, meta-heurística entre outros avanços.

4.8 Algoritmo simplex e branch-and-bound

Para Goldbarg e Luna (2005) “podemos entender por algoritmo qualquer estratégia para solucionar problemas [...].Diremos que um procedimento é uma sequencia finita de instruções e que um algoritmo é um procedimento que termina em um número finito de operações (passos)”. O método simplex é um algoritmo que se apoia nas ferramentas da Álgebra Linear para encontrar, por um método iterativo, a solução ótima de um Problema de Programação Linear (PPL).

Um problema simples de programação linear com apenas duas variáveis de decisão pode ser facilmente resolvido de forma gráfica ou pelo método analítico. A solução gráfica pode ser aplicada para resolução de problemas com, no máximo, três variáveis de decisão, porém, com maior complexidade. Analogamente, a solução analítica torna-se impraticável para problemas com muitas variáveis e equações, já que calcula todas as possíveis soluções básicas. Como alternativa a esses procedimentos, utiliza-se o algoritmo Simplex ou, diretamente, um software existente no mercado (GAMS, AMPL, AIMMS, softwares de planilhas eletrônicas como o Solver do Excel e What's Best, entre outros) para resolução de qualquer problema de programação linear (BELFIORE e FÁVARO, 2013, p. 68).

Segundo Hillier e Lieberman (2006) o algoritmo usa manipulações de matrizes, sendo necessário a descrição do problema em notação matricial. A maneira de executar o algoritmo “não é o procedimento computacional mais eficiente, pois ele calcula e armazena muitos números que não são necessários na iteração atual e que podem até mesmo não se tornar relevantes para tomada de decisão em iterações subsequentes”.

Para Belfiore e Fávaro (2013) o algoritmo *branch-and-bound* (o termo branch significa ramo e o termo bound significa limite) é indicado para programação binária e inteira. Usa o método de divisão e conquista. Resolve-se o problema criando instâncias menores chamadas de subproblemas, sendo que cada um gera um limite superior (maximização) ou inferior (minimização) sobre o valor da função objetivo. A combinação dos subproblemas até que se obtenha a solução ótima do problema original, segundo o algoritmo *branch-and-bound* tem como estrutura de solução uma árvore cujos nós representam os subproblemas e os arcos (ou ramos) conectando dois nós da árvore representam as novas restrições a serem adicionadas ao modelo.

5 MODELOS DE PROGRAMAÇÃO LINEAR UTILIZADOS PARA LOCALIZAÇÃO DE FACILIDADES

O termo “facilidades” deve ser entendido como qualquer ponto de oferta, como depósitos, fábricas, escolas, quartéis, posto de saúde etc. ou ponto de demanda, como clientes, estudantes, unidades de venda entre outros.

A localização de facilidades é um aspecto crítico do planejamento estratégico de empresas privadas e públicas. Exemplos típicos no setor público envolvem decisões de localização de centros de saúde, escolas e estações de bombeiros, enquanto no setor privado tem-se a localização de fábricas, armazéns e centros de distribuição. Em diversas situações, tais como em sistemas de distribuição, as decisões da localização de facilidades e de designação de clientes a facilidades são feitas simultaneamente (ARENALES, AMENTANO, et al., 2011, p. 200).

Para Martins e Laugeni (2005) dentre os fatores importantes para a localização existem aqueles em que os custos podem ser medidos (custo de pessoal, terreno e construção, equipamentos, transportes, água e luz, gás e impostos) e os classificados como não quantificáveis (atitude do pessoal, dos sindicatos e da comunidade, restrições ambientais e governamentais, qualidade de vida etc.) que deverão ser avaliados qualitativamente em conjunto com os outros fatores. Deste modo o referido autor separa os modelos em centro de gravidade, método dos momentos e método do ponto de equilíbrio.

Para Mirchandani (1987 *apud* SOUZA, 1996) a localização de serviços de emergência pode ser obtida através de modelos estáticos, assumindo que todas as viaturas estarão disponíveis para atender as ocorrências (demanda), e modelos dinâmicos, que consideram que algumas viaturas não podem estar disponíveis, pois estarão ocupadas em outro incidente.

Os modelos estáticos incluem modelos de avaliação e de otimização. O modelo de avaliação calcula as medidas de performance como tempo resposta ou proporção de tempo ocupado pelas viaturas durante um período, para várias alternativas de localização, enquanto que os modelos de otimização determinam a localização ótima das instalações de acordo com uma ou mais medidas de performance. Estes modelos podem ser incluídos dentro de duas categorias: a) formulação para cobertura uniforme, que busca minimizar o número de instalações de serviços (facilidades) requeridas, de modo a assegurar que nenhum ponto da área em estudo estará mais afastado que uma distância ou tempo resposta prefixado [...]. b) modelos com formulação destinada a minimizar o tempo de viagem entre a facilidade e os pontos da área em estudo (SOUZA, 1996, p. 21).

Ainda segundo Souza (1996) há também o objetivo de estabelecer se necessita de um cobertura uniforme ou minimizar o tempo de viagens entre a facilidade e os pontos de demanda. Problemas de Máxima Cobertura, Cobertura

Multiobjetivo, Coberturas Capacitadas, e demais soluções para os diversos tipos de casos são encontrados na literatura.

Estabelece Goldberg e Luna (2005) que os problemas de recobrimento, particionamento e *packing* são de “programação linear inteira que se enquadram na classe dos mais difíceis problemas de otimização combinatória existentes”. Possui aplicações, dentre outras, nas áreas de alocação de serviços de emergência, roteamento de petroleiros, gestão estratégica, roteamento de veículos terrestres, caminhos em grafos, localização de estações de radar, distribuição de serviços médicos etc.

A formulação matemática geral dos problemas de programação binária mista especificados por Chopra e Meindl (2011 *apud* BELFIORE e FÁVARO, 2013) estão especificados a seguir:

Índices:

$$i = 1, \dots, m$$

$$j = 1, \dots, n$$

Parâmetros do modelo:

c_{ij} = custo de transporte da localidade i para o consumidor j

f_i = custo fixo e manter a localidade i aberta

$C_{\max,i}$ = capacidade máxima da localidade i

D_j = demanda do consumidor j

Variáveis de decisão:

χ_{ij} = quantidade transportada da localidade i para o consumidor j

$$\gamma_i = \begin{cases} 1, & \text{se a localidade } i \text{ for aberta} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Formulação matemática:

$$F_{obj} = \min Z = \sum_{i=1}^m f_i \gamma_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \chi_{ij} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n \chi_{ij} \leq C_{\max,i} * \gamma_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m \chi_{ij} = \mathcal{D}_j, \quad j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\chi_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$\gamma_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (5)$$

A função objetivo do modelo de localização de facilidades busca minimizar a soma dos custos fixos de manutenção das localidades e dos custos de transportes das localidades para os consumidores finais. A restrição (2) garante que a capacidade máxima de cada localidade i não será excedida. Obviamente, a capacidade da localidade i só vai ser considerada se a mesma for aberta. A segunda restrição (3) garante que a demanda de cada consumidor j será atendida. Finalmente, afirma-se que as variáveis de decisão χ_{ij} são positivas e que as variáveis γ_i são binárias. (BELFIORE e FÁVARO, 2013).

5.1 O modelo p-mediana

Dentre os modelos de programação linear inteira associados a localização de facilidades, conforme descrito anteriormente, o mais famoso é o da p-mediana.

O modelo matemático mais popular associado ao problema de localização de facilidades [...] é o modelo da p-mediana, o qual escolhe P medianas ou pontos para localizar instalações (facilities) de modo a minimizar a impedância do sistema, ou seja, a soma ponderada das distâncias dos clientes, centrados em cada vértice ou centróide, às instalações disponíveis (PIZZOLATO, RAUPP e ALZAMORA, 2012, p. 16).

Segundo Hakimi (1964, 1965, *apud* ARENALES, *et al.*, 2011) matematicamente o modelo pode ser expresso como:

$$(p - \text{mediana}) \quad \min Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \chi_{ij} \quad (6)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m \chi_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^m \gamma_i = P, \quad (8)$$

$$\chi_{ij} \leq \gamma_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (9)$$

$$\gamma_i \in \{0, 1\}, i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (10)$$

$$\chi_{ij} \in \{0, 1\}, i = 1, 2, 3, \dots, m, j = 1, \dots, n \quad (11)$$

A função objetiva (6) busca minimizar o custo total de designação de clientes a facilidades. A garantia de que todo cliente j é atendido por uma única facilidade é obtida com a inclusão da restrição (7). A restrição (9) assegura que cada cliente j só pode ser designado a uma facilidade aberta no local i . A restrição (8) indica o número de facilidades que podem ser abertas, e as restrições (10) e (11) representam o tipo das variáveis.

Observa-se ainda no trabalho de Pizzolato *et al.* (2012) que, em lugar de localização, o modelo da p-mediana pode ser explanado como modelo de zoneamento, “em que se busca dividir o espaço em P zonas, como sugerido para modelos de base de helicópteros, localização de escolas ou centros de saúde”.

Para Santos (2000, *apud* MARTINS e PIZZOLATO, 2004) “o objetivo da solução p-mediana é identificar P instalações [...] que deverão atender a um conjunto de demandas N, de forma que a soma total das distâncias [...] seja a menor possível”. Assim fica definido no caso das p-medianas o número de alternativas conforme a combinação de $\binom{N}{p}$.

5.2 Modelo p-mediana adaptado para serviços de emergência

Para Souza (1996) os modelos de distribuição espacial no plano, de modo geral, foram concebidos de maneira a permitir a localização ótima de uma série de equipamentos ou serviços, alocando uma determinada demanda a eles. A literatura mostra que uma grande variedade de objetivos tem sido otimizada para usos específicos. Estes, geralmente, minimizam alguma função de custos de viagem entre as facilidades e os pontos de demanda, porém apresentam algumas desvantagens quando aplicados em sistemas de atendimento emergencial.

Para um sistema de atendimento de emergência o tempo resposta é o tempo decorrido entre o acionamento do serviço na unidade de emergência e a chegada da primeira viatura de atendimento no local da vítima. Como alternativa ao

tempo resposta, pode-se definir que os “custos” do incidente são os prejuízos que ocorrem em função da demora do atendimento. (SOUZA, 1996).

A avaliação do tempo resposta através de dados oriundos das pesquisas de preferência declarada quase sempre se contrapõem com os das de preferência revelada. Isto é, as pessoas concordam que devem ser implementados os sistemas de emergência desde que esta implementação não implique em substituição de outros serviços prestados ou em aumento de impostos (SOUZA, 1996, p. 57).

Ao se tratar de custos neste trabalho, será referido ao custo operacional, que é o dispêndio monetário que o Estado deve empenhar para garantir a eficiência de atendimento, sendo reservado ao tempo resposta o custo intangível de vidas perdidas.

Para Goldbarg e Luna (2005) os estudos de Pesquisa Operacional para serviços de emergência normalmente fazem as seguintes suposições:

- Tempo de atendimento que deve ser o menor possível, de maneira que não interfira na qualidade do atendimento;
- Região analisada com divisão em áreas onde os pontos de demanda de serviço são agregados no centro de cada área, ou seja, o tempo de viagem é relativo ao ponto central da área estudada.

Poderá então o modelo ter uma função objetivo com o propósito de:

- 1) Minimizar o tempo total de atendimento das chamadas;
- 2) Minimizar o tempo total de viagem (atendimento);
- 3) Maximizar a área de cobertura, dentro de um tempo T;
- 4) Maximizar a cobertura das chamadas (atender ao maior número de chamadas possível), dentro de um tempo T.

Para Souza (1996) pode-se adaptar o modelo Minisun para localização de facilidades que servirão para atendimento de emergências.

Modelo Minisun [...] é muito conveniente em Países com poucos recursos financeiros, como o Brasil, onde normalmente não se tem um número ilimitado de equipamentos para colocar à disposição de todos os usuários, em potencial na área de estudo, a fim de se garantir uma medida mínima de desempenho do sistema, mas sim se dispõe de apenas algumas unidades que devem ser distribuídas da melhor maneira possível (SOUZA, 1996, p. 59).

Segundo Souza (1996) pode-se considerar o conjunto $N = \{1, \dots, n\}$ como sendo das cidades onde poderão ser instalados os quartéis. As cidades pertencentes ao conjunto $M = \{1, \dots, m\}$ serão de atendimento de ocorrências dentro da região

delimitada, determinada de forma precisa se considerar que ocorrerão em direção aos limites da distância de operação no centro da cidade. Define-se que d_{ij} será a distância da cidade i , aonde está instalado o quartel, até a cidade j , aonde será o atendimento. Considere também um subconjunto que será a demanda de chamados de cada cidade, que se denomina a_j . Então a função objetivo será:

$$(p - \text{mediana}) \quad \text{Minimizar: } Z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij} a_j \quad (12)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^m y_i = P \quad (13)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (14)$$

$$y_i \geq X_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m; \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (15)$$

Onde:

m = conjunto de cidades candidatas a receber o quartel;

n = conjunto de cidade que serão atendidas pelo quartel;

P = número de quartéis a serem instalados.

y_i = variável binária assumindo valor 1 se o quartel está instalado na cidade i e 0, caso contrário;

X_{ij} = variável binária assumindo valor 1 se o quartel i atende a cidade j ou valor 0, caso contrário;

d_{ij} = distância rodoviária da cidade i que tem quartel até a cidade de demanda j . É o custo;

a_j = demanda da cidade j para atendimento de ocorrências;

Se for imposto um custo fixo f_i para localizar uma facilidade em uma cidade qualquer i , então torna-se necessário acrescentar um termo adicional na função objetivo (qualitativo).

$$\sum_{i=1}^m f_i y_i \quad (16)$$

Onde:

f_i = *fator de ponderação qualitativo para a instalação do quartel na cidade candidata;*

O modelo de desenvolvimento misto será capaz de proporcionar um caráter mais igualitário para o problema de distribuição de quartéis do Corpo de Bombeiros que possuem em sua essência o caráter de atendimento emergencial. Aplica-se o método da p-mediana, acrescentando as restrições do modelos p-centro e máxima cobertura. Assim, o objetivo de minimizar as distâncias médias entre o quartel e o local do incidente é atingido considerando também o número de chamados de cada cidade, garantindo um melhor tempo resposta para as cidades com maior probabilidade de acidentes. A vantagem de se utilizar a estratégia p-mediana é que se garante a um maior número de pessoas um nível de serviço mais elevado (SOUZA, 1996).

6 APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO AO CBMMA

Conforme a Lei 10.230 de 23 de abril de 2015, que dispõe sobre a Organização Básica do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão, a seguir alterada pela Lei 10.939 de 23 de outubro de 2018, que dispõe sobre a criação e transformação de Unidades de Bombeiros Militar na estrutura do Corpo de Bombeiros Militar do Estado do Maranhão, foram divididos os Comandos Operacionais do Corpo de Bombeiros (COCB) em 07 áreas, sendo previsto a instalação de 32 quartéis, representando 10% dos municípios do Estado contemplados com uma unidade BM. Será adotado para o estudo o COCB-VI que compreende os quartéis, já instalados e em operação, do 6º BBM (Bacabal), 9º CIBM (Santa Inês) e a 2º CIA do 6º BBM (Trizidela do Vale). No Anexo A pode-se observar o mapa com a disposição dos municípios.

A criação de unidade de Bombeiros Militar é função privativa do Governo do Estado, que designa o município ao qual será instalado um quartel Bombeiro Militar através de decreto de lei, conforme plano estratégico.

Neste trabalho serão propostos critérios lógicos para distribuir unidades BM considerando, a exemplo, os municípios da 9º CIA do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão (Santa Inês), conforme divisão institucional já decretada. Utilizar-se-á além do critério da distância entre os diversos municípios, informações relativas à população, número de ocorrências em cada cidade e a probabilidade de ocorrerem incidentes em cada um destes distritos, o que será chamado de demanda ou “índice de risco” que pondera o valor das distâncias entre cada cidade, ou seja, as cidades com maior população possuem a maior probabilidade de acidentes que demandem atendimento emergencial, sendo assim privilegiados na distribuição espacial dos quartéis.

Em termos práticos será utilizado uma adaptação do modelo Minisun que apresenta como vantagem a possibilidade de minimizar a soma dos custos associados com P facilidades, o que é muito conveniente em locais onde normalmente não se tem um número ilimitado de equipamentos públicos à disposição dos usuários da área de estudo, a fim de se garantir uma medida mínima de desempenho do sistema que deve ser distribuído da melhor maneira possível.

A distribuição espacial é um critério de otimização importante e alvo deste estudo, para que, o caráter emergencial/social, que é a finalidade da Instituição do

Corpo de Bombeiros Militar, seja o melhor possível para o cidadão, que avalia tanto o tempo resposta, quanto a habilidade das equipes na prestação do serviço. Neste trabalho o CBMMA estará de posse de uma ferramenta que permite racionalizar o planejamento e a operação de seus serviços emergenciais.

6.1 Formulação do problema

A maioria dos problemas são inicialmente descritos de forma vaga e imprecisa, portanto a definição do problema é fundamental para desenvolver um enunciado consistente do problema que se quer resolver.

O problema balizador da pesquisa é o de alocar quartéis do CBMMA nos municípios, conforme área designada em lei, baseado nos critérios de atendimento emergencial para obter o menor custo operacional.

A atuação dos Corpos de Bombeiros Militar consiste em socorrer, diante de um incidente ou desastre, o maior número de vítimas e diminuir os prejuízos materiais. Mesmo que reconheça que a decisão da localização influenciará a realização destas medidas, considerações subjetivas do valor relativo destas medidas de performance podem ser feitas. Pelo delineamento de Souza e Novaes (2016) a complicação do problema da decisão de onde localizar as unidades de bombeiros é a dificuldade de medir objetivamente o desempenho do atendimento em função dos múltiplos atributos às incertezas da exata localização futura, do número de ocorrências e o tempo resposta de cada um deles.

A pergunta a ser respondida é: Qual município receberá a próxima unidade BM de forma que minimize o custo de atendimento emergencial? Sendo assim, a ferramenta ganha espaço para a tomada de decisão gerencial. É necessário a formulação de um modelo que contemple todos estes requisitos. Em especial, deve ser criado um modelo, que não só otimize a distância a fim de obter o menor custo de instalação, mas também direcione quais municípios serão atendidos por cada quartel instalado, expondo o arranjo de cidades atendidas por cada quartel.

6.2 O funcionamento do ciclo operacional

Uma operação de emergência é ativada quando há uma solicitação de socorro do cidadão através de contato telefônico (193), sendo dividida em fases denominadas de ciclo operacional. Ao considerar que no tempo $t=0$ um incidente

ocorre (um incêndio, um acidente de trânsito, um desabamento, ou uma outra situação de perigo, requerendo uma equipe de atendimento de emergência no local) e que no tempo $t=1$ há o acionamento da central de comando, está se definindo um intervalo de tempo t_1-t_0 que define o acionamento da ocorrência. Para um tempo $t=2$ de acionamento das equipes de atendimento até a chegada no local do incidente, $t=3$, está sendo definido um intervalo de tempo t_3-t_2 de resposta da unidade emergencial, compreendendo a viagem e o tempo de serviço na ocorrência (SOUZA, 1996).

É fato que o tempo de viagem tem maior fator de ponderação no tempo resposta, isso se encontrar o local com rapidez, tendo ainda que levar em consideração tráfego, condições das vias, peso do veículo necessário para atendimento, entre outros. Portanto, para Souza (1996) “as unidades de emergência devem ser distribuídas de forma a diminuir a distância de atendimento, por ser o elemento de impacto na formação do tempo de viagem”. Deve ser considerado ainda, o roteamento, conforme mapa das rodovias do Estado do Maranhão, adotando-se a distância conforme rota de menor tempo de atendimento.

6.3 Função objetivo

A formulação para o modelo recomendado ao CBMMA é uma adaptação matemática do modelo da p-mediana adicionando-se as restrições dos modelos de p-centro e de cobertura, sendo:

$$(p - \text{mediana}) \quad \text{Minimizar: } Z = \sum_{i=1}^m f_i y_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij} a_j \quad (17)$$

A Equação (17) é a função objetivo que pretende minimizar o custo Z para atendimento das ocorrências envolvendo uma soma em que o primeiro termo é o custo de instalação do quartel nas cidades candidatas a receber e o segundo termo é para analisar os custos totais para atendimento das ocorrências, conforme a distribuição matricial. Os parâmetros do modelo, as variáveis de decisão e a formulação matemática geral do modelo estão especificados a seguir:

Parâmetros do modelo:

d_{ij} = distância ponderada do município i ($i=1, \dots, m$) candidata a ter quartel até o município da ocorrência j ($j=1, \dots, n$). É o custo;
 a_j = demanda anual de ocorrências da cidade j ;

Variáveis de decisão:

X_{ij} = variável binária assumindo valor 1 se o quartel i atende o município j ou valor 0, caso contrário;

y_i = variável binária assumindo valor 1 se o quartel está instalado no município i e 0, caso contrário;

f_i = fator de ponderação qualitativo para a instalação do quartel na cidade candidata, caso necessário;

A partir da identificação dos requisitos foi obtida a matriz de distância rodoviária $[d_{ij}]^*$ a partir dos centroides dos municípios da área VI, atendidos pela 9ª CIBM, utilizando o site GOOGLE MAPS e a rota estipulada com o menor tempo de viagem, conforme exposto no Apêndice 1.

Devido a indisponibilidade da informação do número de ocorrências atendidas pelo CBMMA, elaborou-se o Índice de Ocorrências por habitante, conforme parâmetros de ponderação estipulados no trabalho de Souza *et al.* (1997) que utiliza do número de chamados de ocorrências no ano e da população total do estado para realizar o cálculo, a partir da razão entre o número de ocorrências anual pelo total de habitantes, sendo estes dados obtidos através da publicação da revista (Cenário de Emergência / Bombeiros do Brasil, 2014) e utilizando os estados circunvizinhos ao Maranhão para aproximar à realidade do estado. O resultado é exposto na Tabela 3 abaixo:

Tabela 3 – Número de ocorrências por estado no ano de 2014.

ESTADO	OCORRÊNCIAS	HABITANTES
TOTAL	46.208	12.631.984
PARÁ	31.975	7.969.654
TOCANTINS	4.617	1.478.164
PIAUI	9.616	3.184.166

Fonte: Adaptado da revista Cenário de Emergência (2014).

A partir dos dados do número de ocorrência que incide no estado no ano e a população total, pôde-se obter o índice de Ocorrências (I_o), calculado pela equação (18):

$$I_o = \frac{N^{\circ} \text{ Ocorrências}}{\text{Habitantes}} \quad (18)$$

Resultando em:

$$I_o = 46.208 / 12.631.984 = 0.004 \text{ ocorrências/hab.}$$

De posse do I_o a etapa seguinte foi calcular a matriz a_j , que estabelece a Taxa de Ocorrências (Tx) por município por ano, conforme Tabela 4 abaixo:

Tabela 4 – Demanda anual de ocorrências dos municípios da região da 9° CIBM.

Ord.	Município	População (hab.)	Taxa de Ocorrências por ano (Tx)
	Total	646.571	2.377
1	ARAGUANÃ	15.426	57
2	GOVERNADOR NEWTON BELLO	10.180	38
3	NOVA OLINDA DO MARANHÃO	20.928	77
4	PRESIDENTE MÉDICI	7.015	26
5	SANTA LUZIA DO PARUÁ	25.254	93
6	ZÉ DOCA	51.714	190
7	CENTRO DO GUILHERME	13.458	50
8	MARANHÃOZINHO	16.265	60
9	ALTAMIRA DO MARANHÃO	8.128	30
10	VITORINO FREIRE	31.523	116
11	ALTO ALEGRE DO PINDARÉ	31.919	117
12	BELA VISTA DO MARANHÃO	11.209	42
13	BOM JARDIM	41.630	153
14	IGARAPÉ DO MEIO	14.177	52
15	MONÇÃO	33.434	123
16	PINDARÉ-MIRIM	32.941	121
17	PIO XII	21.485	79
18	SANTA INÊS	89.044	326
19	SANTA LUZIA	72.667	266
20	SÃO JOÃO DO CARÚ	15.808	58
21	SATUBINHA	13.914	51
22	TUFILÂNDIA	5.840	22
23	ARARI	29.848	110
24	VITÓRIA DO MEARIM	32.764	120

Fonte: Adaptado de Maranhão (2007).

A matriz ponderada das distâncias $[d_{ij}]$ foi obtida pela fórmula (19):

$$[d_{ij}] = a_j \cdot [d_{ij}]^* \quad (19)$$

Onde:

$[d_{ij}]^*$ = a distância rodoviária entre o município i e o município j ;

a_j = a taxa de ocorrências anuais demandada em cada município j .

O valor do fator de ponderação qualitativo f_i para instalação do quartel foi zerado neste trabalho por que o objetivo aqui não é estipular valor de instalação de quartel e sim de apresentar o modelo, mas ficará a cargo do gestor do modelo, caso haja contrapartidas monetárias e qualitativas que favoreçam a instalação do quartel no município candidato, a ativação deste módulo na função objetivo. Devido a mobilização de forças municipais, estaduais e civis para reunião dos recursos materiais e humanos para a efetiva operacionalidade do quartel esta variável pode possuir peso significativo, alterando o resultado.

6.4 Restrições

Seguindo com a formulação do modelo, algumas restrições são necessárias para o efetivo funcionamento da função objetivo, sendo sujeito às seguintes restrições:

$$\sum_{i=1}^m y_i = P \quad (20)$$

Para os termos de sujeição tem-se a equação (20) que determina o número máximo de cidades que receberão os quartéis. Esta limitação é arbitrária e garante a forma de distribuição, limitando também quais municípios serão atendidos pelas cidades onde estão instalados os quartéis. Deve-se adicionar como restrição também a equação (21), expressada logo abaixo, para garantir que cada cidade seja atendida por apenas um quartel, criando assim a rede de distribuição (zoneamento) das cidades atendidas por cada quartel instalado.

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i = 1, 2, 3, \dots, M \quad (21)$$

A sujeição da equação (22), indicada logo abaixo, é para assegurar que os municípios i podem ser servidos apenas pelos quartéis nas cidades estabelecidas (abertos), ou seja, não pode atribuir variáveis binárias de decisão para outras cidades que não estão guarnecidas. Isto é, se $y_i = 1$ então X_{ij} também deve ser igual a 1.

$$y_i \geq X_{ij} \quad i = 1, 2, 3, \dots, M ; j = 1, 2, 3, \dots, N \quad (22)$$

6.5 Modelo Computacional

Para a solução do modelo criado para o CBMMA utilizou-se o programa LP_SOLVE versão 5.5.2.5, que aplica métodos de resolução difundidos na vasta literatura.

O lp_solve é um solucionador de programação linear (inteiro) gratuito (consulte LGPL para a licença do público em geral menor do GNU) com base no método simplex revisado e no método Branch-and-bound para os números inteiros. Ele contém fonte completa, exemplos e manuais. O lp_solve resolve modelos puros lineares, inteiros/binários, semi-contínuos e conjuntos especiais ordenados (SOS). Observe a palavra linear. Isso significa que as equações devem ser de primeira ordem (LP_SOLVE, 2020, p. 1).

No desenvolvimento do modelo para o algoritmo computacional todas as restrições previstas no modelo matemático foram consideradas e elaboradas previamente no programa MO Excel 2019. Após esta etapa foram extrapoladas as equações para o programa Lp_solve para posterior execução de cálculo. No Apêndice 2 é exposto a rotina de cálculo conforme linguagem adotada pelo programa.

7 RESULTADOS

A depuração do Código executado retorna os resultados, conforme Tabela 5, para o dado exógeno P da quantidade de quartéis a serem instalados no universo dos 24 municípios atendidos pela 9° CIBM.

Tabela 5 – Resultado do modelo p-mediana aos municípios atendidos pela 9° CIBM.

Número de Quartéis (P)	Município de Instalação do Quartel	Quant. de municípios atendidos	Custo (Z)
1	Santa Inês	23	142.512
2	Santa Inês	18	99.351
	Santa Luzia do Paruá	06	
3	Santa Inês	14	82.612
	Santa Luzia do Paruá	06	
	Santa Luzia	04	
4	Santa Inês	12	66.482
	Santa Luzia do Paruá	06	
	Santa Luzia	04	
	Vitória do Mearim	02	
5	Santa Inês	10	52.921
	Santa Luzia do Paruá	05	
	Santa Luzia	04	
	Vitória do Mearim	02	
	Zé Doca	03	

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

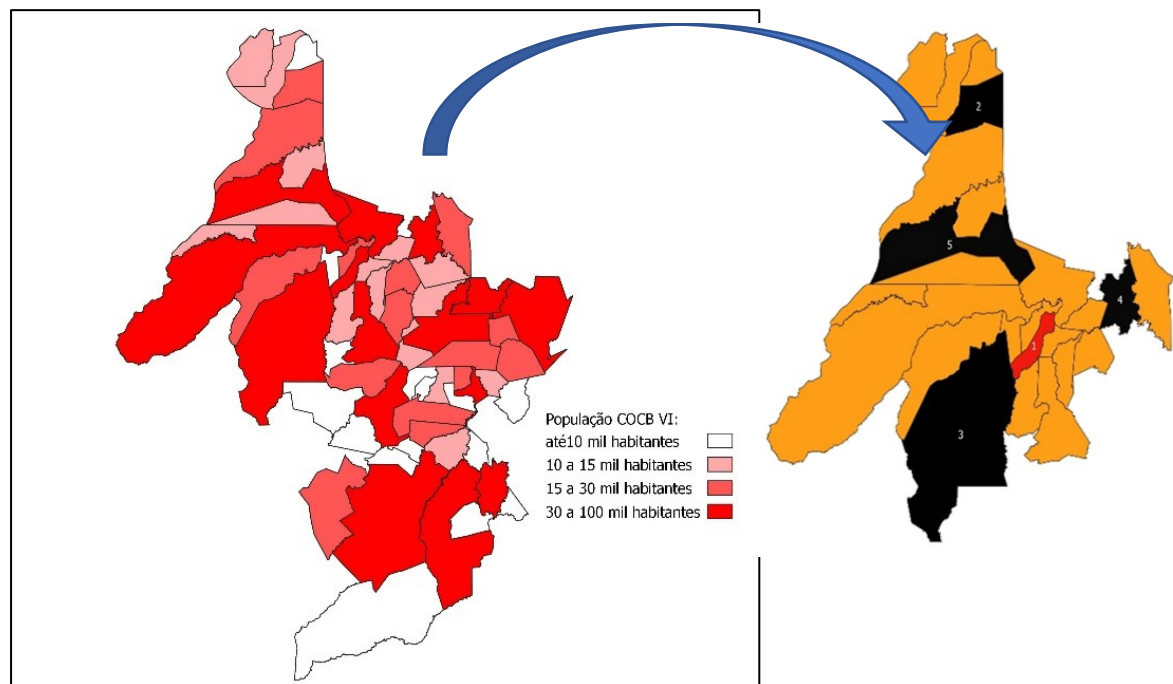
Pode-se inferir da Tabela 5 os seguintes comportamentos do modelo computacional:

- I. À medida que se aumenta o número de quartéis o custo de operação (Z) tende a diminuir, chegando a uma redução de 63% em relação a instalação de apenas um quartel para a região alvo.
- II. Quando se arbitra P=2, o município onde será instalado o quartel não é o segundo mais populoso, e sim, o décimo-primeiro, exibindo a eficiência de utilização das rotas rodoviárias como variável de peso para a análise, obtendo redução de 30% do custo total de operação.

- III. A redução do custo operacional total tende a ser cerca de 20% menor para cada unidade de quartel instalada ao observar o comportamento da reta (Z).

Ao representar graficamente a solução observa-se que a região atendida pelo 9º CIBM possui 7 municípios com mais de 30 mil habitantes (cor vermelha) e que ao calcular o algoritmo da p-mediana com 5 unidades de quartéis o atendimento fica distribuído geograficamente, porém com uma sequência de abertura de unidades que não segue critérios geográficos, mas sim de rotas rodoviárias.

Figura 4 – Mapa de calor da população dos municípios do COCB VI.



Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Fica evidenciado diante destes resultados que o zoneamento indicado por Pizzolato *et al.* (2012) pode ser extraído ao utilizar o modelo da p-mediana com as restrições indicadas, facilitando assim a regionalização. É possível prever o custo total implantado para o estado atual do sistema, ou seja, considerando as cidades com quartéis já instalados, bastando para isso, definir o nó correspondente da cidade (linha i) igual a 1. Como Santa Inês já possui quartel instalado, poderia ser determinado $y_{18} = 1$, o que não foi feito neste trabalho devido ao município ser a primeira opção de resposta para $P=1$.

A resolução do algoritmo foi realizada em 0.023 segundos no programa LP_Solve para o modelo proposto e com $P=5$. A resolução em programa computacional próprio para programação linear ressalta a importância dada por Belfiore e Fávaro (2013) que diz ser impraticável a resolução analítica deste algoritmo que possui mais de três variáveis, para ser exato, seiscentos neste exemplo.

A comparação entre o tempo de solução computacional e o tempo para obtenção da matriz de distância rodoviária é relevante. Enquanto que a solução ótima é obtida em menos de um segundo, a matriz quadrada de distância rodoviária entre as cidades da região é obtida em dias, visto que há custo para que sites especializados possam fornecer essas informações, que ainda sim devem ser tratadas.

A obtenção do vetor a_j é um fator crucial para a solução ótima, visto que aumenta a distância a ser percorrida devido ao número de chamados no ano. Nota-se que a proporcionalidade é mantida entre os municípios, ou seja, constatando que a probabilidade de chamados será tão maior quanto a densidade populacional do município, o que é dito como verdade pela revista Cenário de Emergência/Bombeiros do Brasil com publicação datada no ano de 2014.

8 CONCLUSÃO

O desenvolvimento de pesquisas na área de atendimento emergencial é fundamental para o planejamento da localização de quartéis de Bombeiros Militar. A divulgação de conhecimento e transferência de tecnologia do meio acadêmico para o prático é fundamental para suprir as necessidades do Estado quanto a excelência de atendimento dos serviços e a racionalização dos recursos disponíveis. Estas características levaram a constatação de que é necessário disponibilizar ferramentas que possam auxiliar os gestores na identificação dos municípios onde devem ser instalados quartéis de Bombeiros para proporcionar, ao menor custo possível, o atendimento emergencial de qualidade.

Para o alcance do objetivo principal deste trabalho foi necessário atender quatro objetivos específicos. O primeiro objetivo proposto foi atendido por meio da seleção da região do COCB VI, que possui municípios interligados por malha rodoviária e que estão povoados com o mínimo quinze mil habitantes, tornando todas as cidades candidatas a ter um posto de Bombeiros Militar.

O alcance do segundo objetivo específico que previa selecionar um modelo de programação linear se deu por meio de revisão bibliográfica, que elencou as ferramentas da Pesquisa Operacional disponíveis para solução de problemas de localização de facilidades, escolhendo dentre os modelos disponíveis o da p-mediana, modelo de programação linear binária cuja função objetivo deve ser minimizada. Ressalta-se ainda que o modelo adotado possui vantagens gráficas ao delimitar as zonas de atendimento de cada quartel instalado.

O terceiro objetivo específico foi concretizado ao estratificar o problema de localização em etapas, que consistiu em elaborar a matriz de distância, aplicar um vetor para ponderar com o número de ocorrências e aplicar as restrições características de serviço emergencial.

O quarto objetivo específico foi atendido com a utilização do software LP-Solve e consistiu em adequar todas as equações lineares do modelo da p-mediana para a linguagem do programa. A solução utiliza o método simplex e algoritmo de *Branch-and-Bound* para encontrar a solução ótima do problema.

O modelo da p-mediana aplicado na área do COCB VI do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão demonstrou ser eficaz ao minimizar a distância de atendimento para cada incremento de unidade de quartel. As restrições utilizadas no

modelo demonstraram ser eficientes ao organizar por zonas de atendimento, proporcionando um aspecto diferenciado de atendimento de cada quartel, já que obriga a unidade a uma especialização imposta pelas características dos municípios da zona, conforme o número de quartéis arbitrado.

A dificuldade do modelo p-mediana está em obter a matriz de distância rodoviária entre as cidades, visto que a matriz é dita simétrica e com muitos nós. Há disponível recursos computacionais para obtenção desta matriz, porém incorre em custo para o operador do modelo. Nos moldes ao qual foram obtidos a matriz a_j , utilizando dados externos ao Maranhão, consegue-se observar que o comportamento do modelo não muda com este vetor, e que a exatidão da informação é que irá aproximar os resultados da realidade e não a forma de obtenção dos dados.

Conclui-se, portanto, que o desenvolvimento do modelo da p-mediana, através de programa computacional, serve como ferramenta para auxiliar os gestores na tomada de decisão para localizar os postos de bombeiros de forma a minimizar a distância de atendimento. De forma simples é possível introduzir os dados e analisar os resultados. Considerando a falta de estatísticas e ferramentas para o registro de dados, características de países em desenvolvimento como o Brasil, os programas permitem que as informações obtidas dos órgãos públicos possam ser aplicadas e se aproximarem do resultado ótimo.

A pesquisa desenvolvida ganhará robustez se adicionar o termo qualitativo da equação do modelo da p-mediana abordado neste trabalho. A inserção de um formulário qualitativo para dar peso às cidades que possuem condições de instalações melhores pode viabilizar a sua escolha. Isto se deve ao beneficiar cidades que possuem hospitais, aeroportos, ajuda de custo do município, entre outros fatores que favorecem a movimentação de militares e suas famílias. A utilização de outros softwares também agrega valor ao modelo e pode tornar o mesmo acessível a outras ferramentas, como exemplo, aplicativos que são atualizados em tempo real.

REFERÊNCIAS

- ARENALES, M. et al. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, v. Único, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**: informação e documentação - resumo - apresentação. Rio de Janeiro: [s.n.], 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: Informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.
- BELFIORE, P.; FÁVARO, L. P. **Pesquisa operacional para cursos de engenharia**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- CENÁRIO de Emergência / Bombeiros do Brasil. **Revista Emergência**, Julho 2014.
- CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO. Unidades Bombeiros Militar do Estado. **CBMMA**, 2020. Disponível em: <<https://cbm.ssp.ma.gov.br/index.php/unidades-bm/regionalizacao/#1516380129970-3ae73eff-fa34>>. Acesso em: 07 julho 2020.
- EOM, S.; KIM, E. A survey of decision support system applications (1995-2001). **Journal of the Operational Research Society**, p. 15, Novembro 2006.
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Normas de apresentação tabular**. 3°. ed. Rio de Janeiro: Centro de documentação e disseminação de informações, 1993.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4°. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. **Otimização combinatória e programação linear**: modelos e algoritmos. 2°. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.
- GOOGLE MAPS. **GOOGLE**. Disponível em: <<https://www.google.com/maps/>>. Acesso em: Novembro 2019.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. 8°. ed. São Paulo: McGraw-Hill, v. Único, 2006.
- LP_SOLVE. **lp_solve reference guide menu**. [S.l.]: [s.n.], 2020. Disponível em: <<http://lpsolve.sourceforge.net/5.5/>>. Acesso em: 2020.
- MARANHÃO. **LEI COMPLEMENTAR Nº 108 DE 21 DE NOVEMBRO DE 2007**: Dispõe sobre a criação de 32 regiões para o planejamento, e dá outras providências. São Luís: Assembleia Legislativa, 2007.
- MARANHÃO. **Lei Nº 10.230, de 23 de abril de 2015**: Dispõe sobre a Organização Básica do Corpo de Bombeiros Militar do Maranhão e dá outras providências. São

Luís: Assembléia Legislativa, 2015. Disponível em: <<http://legislacao.al.ma.gov.br/ged/busca.html;jsessionid=6opRh64kAJ0vEnZiz2vsE12btTCgly-2czG8cpFQ.intranet>>. Acesso em: 09 dezembro 2019.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de pesquisa**. 5°. ed. São Paulo: Atlas, v. único, 2002.

MARTINS, I.; PIZZOLATO, N. **Utilização da p-mediana para simulação de bases táticas de helicópteros policiais**. XI SIMPEP. Bauru: [s.n.]. 2004. p. 11.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da produção**. 2°. ed. São Paulo: Saraiva, v. Único, 2005.

PIZZOLATO, N.; RAUPP, F.; ALZAMORA, G. Revisão de desafios aplicados em localização com base em modelos da p-mediana e suas variantes. **PODes**, Rio de Janeiro, v. 4, p. 13-42, janeiro 2012. ISSN 1.

REVELLE, C. et al. **Facility location**: A review od context-free and EMS Moledels. Health services research. [S.l.]: [s.n.]. 1977. p. 129-146.

SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. 3°. ed. Florianópolis: Laboratório de ensino a distância da UFSC, 2001. 121 p.

SOUZA, J. C. **Dimensionamento, localização e escalonamento de serviços de atendimento emergencial**. [S.l.]: [s.n.], 1996. 108 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina - Florianópolis - 1996.

SOUZA, J. C.; NOVAES, A. G. N. Paper 179. **Sistema de atendimento móvel de urgência - SAMU. Dimensionamento espacial em áreas urbanas.**, Santa Catarina, 2016.

SOUZA, J. C.; NOVAES, A. G.; GONÇALVES, M. B. **Utilização do índice de risco em problemas de localização espacial com P-medianas**. XVII ENEGEP. Gramado: [s.n.]. 6 Outubro 1997.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO. **Manual para normalização de trabalhos acadêmicos**. 3ª. ed. São Luís: EDUEMA, 2019. rev., atual. e ampl.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MATRIZ DE DISTÂNCIA $[d_{ij}]$

Ord.	MUNICÍPIOS	ARAGUANÃ	GOVERNADOR NEWTON BELLO	NOVA OLINDA DO MARANHÃO	PRESIDENTE MÉDICI	SANTA LUZIA DO PARUÁ	ZÉ DOCA	CENTRO DO GUILHERME	MARANHÃOZINHO	ALTAMIRA DO MARANHÃO	VITORINO FREIRE	ALTO ALEGRE DO PINDARÉ	BELA VISTA DO MARANHÃO	BOM JARDIM	IGARAPÉ DO MEIO	MONÇÃO	PINDARÉ-MIRIM	PIO XII	SANTA INÊS	SANTA LUZIA	SÃO JOÃO DO CARÚ	SATUBINHA	TUIFILÂNDIA	ARARI	VITÓRIA DO MEARIM
1	ARAGUANÃ	1	54	16,6	64,9	46,9	37,2	101	81,8	184	194	146	113	69,7	122	146	94,3	138	99,8	145	149	135	123	183	171
2	GOVERNADOR NEWTON BELLO	54	1	70,6	119	101	17,7	155	136	130	140	92,5	59,5	16,4	68,9	61,2	41	84,3	46,5	91,7	95,6	82	70,2	129	118
3	NOVA OLINDA DO MARANHÃO	16,6	70,6	1	48,3	30,3	53,8	84,9	65,2	200	210	216	129	86,3	139	163	111	154	116	162	165	152	140	199	188
4	PRESIDENTE MÉDICI	64,9	119	48,3	1	18	102	36,6	17	249	259	211	178	135	187	211	159	202	165	210	214	200	188	247	236
5	SANTA LUZIA DO PARUÁ	46,9	101	30,3	18	1	84	54,6	34,9	231	241	193	160	117	169	193	141	184	147	192	196	182	170	229	218
6	ZÉ DOCA	37,2	17,7	53,8	102	84	1	139	119	147	135	109	76,5	33,4	85,8	110	58	102	63,7	109	113	99,3	87,3	146	135
7	CENTRO DO GUILHERME	101	155	84,9	36,6	54,6	139	1	49,3	285	295	247	214	171	224	248	196	239	201	262	266	253	241	300	288
8	MARANHÃOZINHO	81,8	136	65,2	17	34,9	119	49,3	1	266	276	228	195	151	204	228	176	219	182	227	231	217	205	264	253
9	ALTAMIRA DO MARANHÃO	184	130	200	249	231	147	285	266	1	31,1	94,8	96,6	114	106	130	89,3	86,9	85,8	38,8	196	66,1	86,7	166	155
10	VITORINO FREIRE	194	140	210	259	241	135	295	276	31,1	1	126	85,4	124	95,5	119	99,5	56,2	93,4	69,7	206	77,2	118	227	156
11	ALTO ALEGRE DO PINDARÉ	146	92,5	216	211	193	109	247	228	94,8	126	1	69,8	76,1	79,1	103	54,6	94,6	59	55,6	158	92,3	28,8	139	128
12	BELA VISTA DO MARANHÃO	113	59,5	129	178	160	76,5	214	195	96,6	85,4	69,8	1	43,2	14,6	38,5	18,6	29,2	12,4	58,3	125	27	47,5	74,9	63,5
13	BOM JARDIM	69,7	16,4	86,3	135	117	33,4	171	151	114	124	76,1	43,2	1	52,5	76,4	24,6	67,9	30,1	75,3	81,7	65,7	53,7	113	101
14	IGARAPÉ DO MEIO	122	68,9	139	187	169	85,8	224	204	106	95,5	79,1	14,6	52,5	1	23,9	27,7	39,6	21,5	67,4	134	37,3	56,7	60,3	49
15	MONÇÃO	146	61,2	163	211	193	110	248	228	130	119	103	38,5	76,4	23,9	1	51,1	63	45	90,9	157	60,7	80,1	76,9	65,5
16	PINDARÉ-MIRIM	94,3	41	111	159	141	58	196	176	89,3	99,5	54,6	18,6	24,6	27,7	51,1	1	43,3	5,5	50,7	106	41,1	32,3	88,2	76,9
17	PIO XII	138	84,3	154	202	184	102	239	219	86,9	56,2	94,6	29,2	67,9	39,6	63	43,3	1	37,2	83,1	150	21	72,3	99,7	88,3
18	SANTA INÊS	99,8	46,5	116	165	147	63,7	201	182	85,8	93,4	59	12,4	30,1	21,5	45	5,5	37,2	1	46,8	112	34,9	37,7	82,1	70,7
19	SANTA LUZIA	145	91,7	162	210	192	109	262	227	38,8	69,7	55,6	58,3	75,3	67,4	90,9	50,7	83,1	46,8	1	157	80,6	48,2	128	116
20	SÃO JOÃO DO CARÚ	149	95,6	165	214	196	113	266	231	196	206	158	125	81,7	134	157	106	150	112	157	1	147	135	195	183
21	SATUBINHA	135	82	152	200	182	99,3	253	217	66,1	77,2	92,3	27	65,7	37,3	60,7	41,1	21	34,9	80,6	147	1	70,1	97,4	86
22	TUIFILÂNDIA	123	70,2	140	188	170	87,3	241	205	86,7	118	28,8	47,5	53,7	56,7	80,1	32,3	72,3	37,7	48,2	135	70,1	1	117	106
23	ARARI	183	129	199	247	229	146	300	264	166	227	139	74,9	113	60,3	76,9	88,2	99,7	82,1	128	195	97,4	117	1	11,5
24	VITÓRIA DO MEARIM	171	118	188	236	218	135	288	253	155	156	128	63,5	101	49	65,5	76,9	88,3	70,7	116	183	86	106	11,5	1

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

APÊNDICE B – EQUAÇÕES LINEARES DO PROGRAMA LP_SOLVE.

Primeiro foi elaborado a função objetivo no MO Excel 2019 com a multiplicação da matriz binária com a matriz de distâncias ponderadas, conforme figura 05.

Figura 5 – Elaboração da função objetivo a partir da multiplicação das matrizes.

		ARAGUANÃ			GOVERNADOR NEWTON BELLO			NOVA OLINDA DO MARANHÃO			PRESIDENTE MÉDICI	
		1			2			3			4	
1	ARAGUANÃ	57	x11	+	2052	x12	+	1278	x13	+	1687	x14
2	GOVERNADOR NEWTON BELLO	3078	x21	+	38	x22	+	5436	x23	+	3094	x24
3	NOVA OLINDA DO MARANHÃO	946,2	x31	+	2683	x32	+	77	x33	+	1256	x34
4	PRESIDENTE MÉDICI	3699	x41	+	4522	x42	+	3719	x43	+	26	x44
5	SANTA LUZIA DO PARUÁ	2673	x51	+	3838	x52	+	2333	x53	+	468	x54
6	ZÉ DOCA	2120	x61	+	672,6	x62	+	4143	x63	+	2652	x64
7	CENTRO DO GUILHERME	5757	x71	+	5890	x72	+	6537	x73	+	951,6	x74
8	MARANHÃOZINHO	4663	x81	+	5168	x82	+	5020	x83	+	442	x84

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

As restrições foram elaboradas no MO Excel para posterior lançamento no programa LP-Solve, conforme observado nas figuras 6, 7 e 8:

Figura 6 – Restrição de atendimento por apenas um quartel.

x11	x21	x31	x41	x51	x61	x71	x81	x91	x101	x11155	x12155	x131	x141	x151	x161	x171	x181	x191	x201	x21155	x22155	x231	x241	=	1	;
x12	x22	x32	x42	x52	x62	x72	x82	x92	x102	x11255	x12255	x132	x142	x152	x162	x172	x182	x192	x202	x21255	x22255	x232	x242	=	1	;
x13	x23	x33	x43	x53	x63	x73	x83	x93	x103	x11355	x12355	x133	x143	x153	x163	x173	x183	x193	x203	x21355	x22355	x233	x243	=	1	;
x14	x24	x34	x44	x54	x64	x74	x84	x94	x104	x11455	x12455	x134	x144	x154	x164	x174	x184	x194	x204	x21455	x22455	x234	x244	=	1	;
x15	x25	x35	x45	x55	x65	x75	x85	x95	x105	x11555	x125	x135	x145	x155	x165	x175	x185	x195	x205	x21555	x225	x235	x245	=	1	;
x16	x26	x36	x46	x56	x66	x76	x86	x96	x106	x11655	x126	x136	x146	x156	x166	x176	x186	x196	x206	x21655	x226	x236	x246	=	1	;
x17	x27	x37	x47	x57	x67	x77	x87	x97	x107	x11755	x127	x137	x147	x157	x167	x177	x187	x197	x207	x21755	x227	x237	x247	=	1	;
x18	x28	x38	x48	x58	x68	x78	x88	x98	x108	x11855	x128	x138	x148	x158	x168	x178	x188	x198	x208	x21855	x228	x238	x248	=	1	;
x19	x29	x39	x49	x59	x69	x79	x89	x99	x109	x11955	x129	x139	x149	x159	x169	x179	x189	x199	x209	x21955	x229	x239	x249	=	1	;
x110	x210	x310	x410	x510	x610	x710	x810	x910	x1010	x1110	x1210	x1310	x1410	x1510	x1610	x1710	x1810	x1910	x2010	x2110	x2210	x2310	x2410	=	1	;
x111	x211	x311	x411	x511	x611	x711	x811	x911	x1011	x1111	x1211	x1311	x1411	x1511	x1611	x1711	x1811	x1911	x2011	x2111	x2211	x2311	x2411	=	1	;
x112	x212	x312	x412	x512	x612	x712	x812	x912	x1012	x1112	x1212	x1312	x1412	x1512	x1612	x1712	x1812	x1912	x2012	x2112	x2212	x2312	x2412	=	1	;
x113	x213	x313	x413	x513	x613	x713	x813	x913	x1013	x1113	x1213	x1313	x1413	x1513	x1613	x1713	x1813	x1913	x2013	x2113	x2213	x2313	x2413	=	1	;
x114	x214	x314	x414	x514	x614	x714	x814	x914	x1014	x1114	x1214	x1314	x1414	x1514	x1614	x1714	x1814	x1914	x2014	x2114	x2214	x2314	x2414	=	1	;
x115	x215	x315	x415	x515	x615	x715	x815	x915	x1015	x1115	x1215	x1315	x1415	x1515	x1615	x1715	x1815	x1915	x2015	x2115	x2215	x2315	x2415	=	1	;
x116	x216	x316	x416	x516	x616	x716	x816	x916	x1016	x1116	x1216	x1316	x1416	x1516	x1616	x1716	x1816	x1916	x2016	x2116	x2216	x2316	x2416	=	1	;
x117	x217	x317	x417	x517	x617	x717	x817	x917	x1017	x1117	x1217	x1317	x1417	x1517	x1617	x1717	x1817	x1917	x2017	x2117	x2217	x2317	x2417	=	1	;
x118	x218	x318	x418	x518	x618	x718	x818	x918	x1018	x1118	x1218	x1318	x1418	x1518	x1618	x1718	x1818	x1918	x2018	x2118	x2218	x2318	x2418	=	1	;
x119	x219	x319	x419	x519	x619	x719	x819	x919	x1019	x1119	x1219	x1319	x1419	x1519	x1619	x1719	x1819	x1919	x2019	x2119	x2219	x2319	x2419	=	1	;
x120	x220	x320	x420	x520	x620	x720	x820	x920	x1020	x1120	x1220	x1320	x1420	x1520	x1620	x1720	x1820	x1920	x2020	x2120	x2220	x2320	x2420	=	1	;
x121	x221	x321	x421	x521	x621	x721	x821	x921	x1021	x1121	x1221	x1321	x1421	x1521	x1621	x1721	x1821	x1921	x2021	x2121	x2221	x2321	x2421	=	1	;
x122	x222	x322	x422	x522	x622	x722	x822	x922	x1022	x1122	x1222	x1322	x1422	x1522	x1622	x1722	x1822	x1922	x2022	x2122	x2222	x2322	x2422	=	1	;
x123	x223	x323	x423	x523	x623	x723	x823	x923	x1023	x1123	x1223	x1323	x1423	x1523	x1623	x1723	x1823	x1923	x2023	x2123	x2223	x2323	x2423	=	1	;
x124	x224	x324	x424	x524	x624	x724	x824	x924	x1024	x1124	x1224	x1324	x1424	x1524	x1624	x1724	x1824	x1924	x2024	x2124	x2224	x2324	x2424	=	1	;

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 7 – Restrição de atendimento apenas por cidades com quartel instalado.

y1	>=	x120	;
y1	>=	x121	;
y1	>=	x122	;
y1	>=	x123	;
y1	>=	x124	;
y2	>=	x21	;
y2	>=	x22	;
y2	>=	x23	;
y2	>=	x24	;
y2	>=	x25	;
y2	>=	x26	;

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Figura 8 – Definição das variáveis binárias.

BIN	x1624	;
BIN	x1724	;
BIN	x1824	;
BIN	x1924	;
BIN	x2024	;
BIN	x2124	;
BIN	x2224	;
BIN	x2324	;
BIN	x2424	;
BIN	y1	;
BIN	y2	;
BIN	y3	;
BIN	y4	;
BIN	y5	;
BIN	y6	;
BIN	y7	;
BIN	y8	;
BIN	y9	;
BIN	y10	;

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

Após elaboração das equações definidas pelo modelo, houve a inserção das mesmas no software LP-Solve para resolução. A linguagem e aspectos da linguagem do programa podem ser observados na Figura 9 abaixo:

Fonte: Elaborado pelo autor (2020).

ANEXO A – MAPA DOS MUNICÍPIOS ATENDIDOS PELO COCB-VI



ESTADO DO MARANHÃO
SECRETARIA DE ESTADO DA SEGURANÇA PÚBLICA
CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO

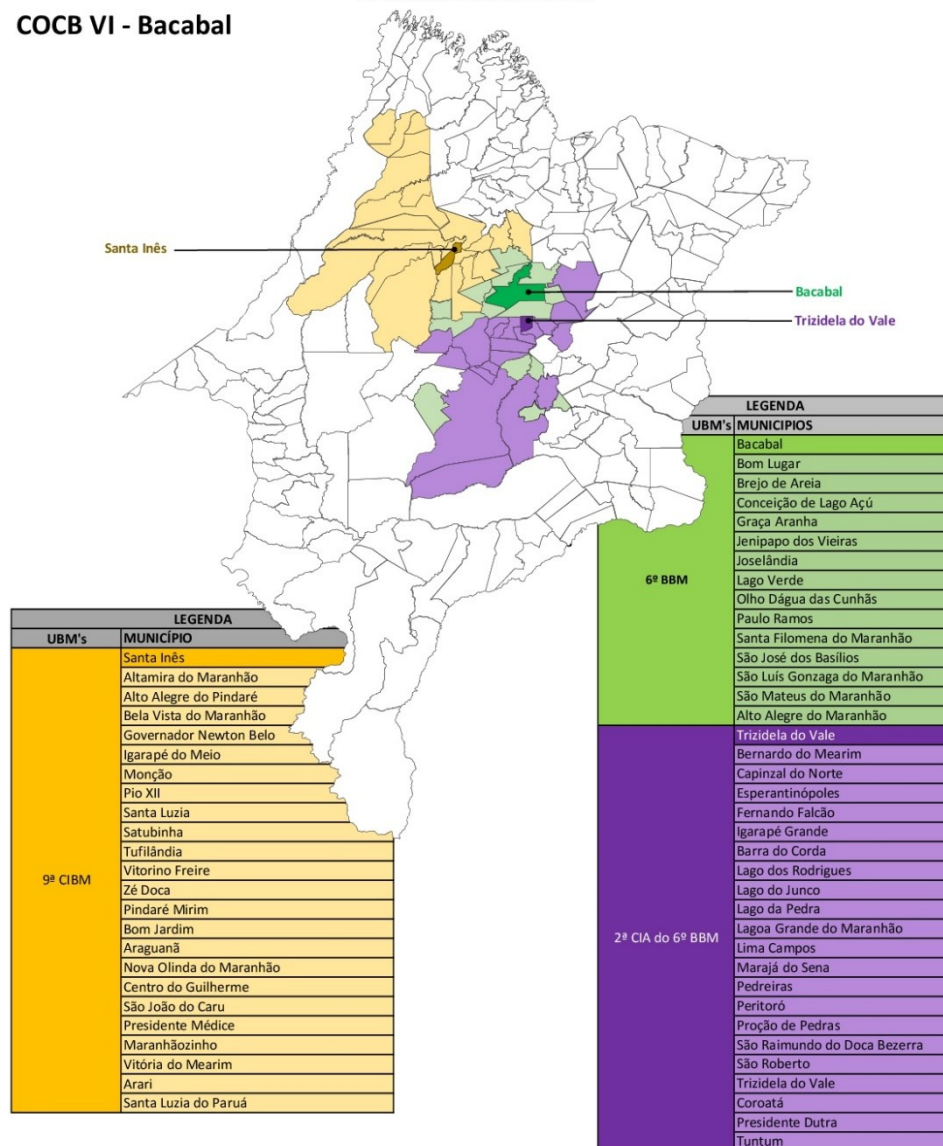


Atualizado em: 19/01/2018

COMANDO OPERACIONAL DO CORPO DE BOMBEIROS MILITAR VI

PORTARIA No 035/2017/Gab.Cmdo

COCB VI - Bacabal



Fonte: (CORPO DE BOMBEIROS MILITAR DO MARANHÃO, 2020)