



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

**MODELOS MONO E MULTIOBJETIVO PARA O  
PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE MÁXIMA  
COBERTURA: ESTUDO DE CASO  
SAMU-BH**

**MARIANA MENDES GUIMARÃES**

BELO HORIZONTE  
FEVEREIRO DE 2018

**MARIANA MENDES GUIMARÃES**

**MODELOS MONO E MULTIOBJETIVO PARA O  
PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE MÁXIMA  
COBERTURA: ESTUDO DE CASO SAMU-BH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Modelagem Matemática e Computacional.

Área de concentração: Modelagem Matemática e Computacional

Linha de pesquisa: Sistemas Inteligentes

Orientador: Flávio Vinícius Cruzeiro Martins

Coorientador: Fabio Rocha da Silva

BELO HORIZONTE  
FEVEREIRO DE 2018

G963m Guimarães, Mariana Mendes  
Modelos mono e multiobjetivo para o problema de localização de máxima cobertura: estudo de caso SAMU-BH. / Mariana Mendes Guimarães. -- Belo Horizonte, 2018.  
xiv, 115 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Flávio Vinícius Cruzeiro Martins  
Coorientador: Prof. Dr. Fabio Rocha da Silva

#### Bibliografia

1. Otimização Combinatória. 2. Programação Linear. 3. Alocação de Recursos – Saúde Pública. I. Martins, Flávio Vinícius Cruzeiro. II. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 519.72



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
COORDENAÇÃO DO CURSO DE MESTRADO EM MODELAGEM MATEMÁTICA E COMPUTACIONAL

**“MODELOS MONO E MULTI OBJETIVO PARA O PROBLEMA DE LOCALIZAÇÃO DE MÁXIMA COBERTURA: ESTUDO DE CASO SAMU-BH”**

Dissertação de Mestrado apresentada por **Mariana Mendes Guimarães**, em 07 de fevereiro de 2018, ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Matemática e Computacional do CEFET-MG, e aprovada pela banca examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Flávio Vinícius Cruzeiro Martins (Orientador)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Fábio Rocha da Silva (Coorientador)  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Eduardo Gontijo Carrano  
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Joaquim José da Cunha Júnior  
Centro Universitário de Belo Horizonte

Prof.ª Dr.ª Elisângela Martins de Sá  
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Visto e permitida a impressão,

Prof. Dr. José Geraldo Peixoto de Faria  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Modelagem Matemática e Computacional

Dedico este trabalho em especial aos meus pais, por sempre terem investido na minha educação.

Aos meus irmãos, por serem meu porto seguro e a minha certeza de que nunca estarei sozinha.

Aos meus amigos, pelos olhares de admiração que me encorajam a seguir em frente e pelos momentos de ócio que me fizeram chegar sã até aqui.



# Agradecimentos

Agradeço imensamente à minha família e aos meus amigos, que enchem de amor a minha caminhada e me fizeram chegar até aqui em paz e segura para descobrir o meu propósito na vida.

Ao professor Flávio Cruzeiro, por me ouvir, me ensinar e me orientar. Terminei meu mestrado com o coração feliz por ter seguido os caminhos que desejava, sempre com seu apoio integral. Isso não tem preço, obrigada!

Sou muito grata pela escolha que fiz pela Modelagem Matemática Computacional. Deixo o MMC não só com maior conhecimento técnico, mas com uma nova visão de mundo que só a interdisciplinaridade poderia me proporcionar. Agradeço aos professores Elizabeth Wanner, Elisangela Sá, Sérgio Ricardo, Thiago Matos, Thiago Rodrigues, Antônio Scarpelli, Marcione Souza e Fábio Rocha, pelo aprendizado e pelas reflexões.

Ao professor e colega de profissão Joaquim Cunha que me inspirou a seguir pelo caminho da docência. Ao colega Renan Santos, pela parceria e disponibilidade, e à equipe do SAMU, em especial ao André e à Dr<sup>a</sup> Raquel pela assistência e carinho durante todo o processo.

Ao Cefet-MG e à agência de fomento Fapemig pelo apoio financeiro.

Minha eterna gratidão!

*“Se você é uma pessoa talentosa, isso não significa que você ganhou algo. Significa que você tem algo a oferecer.” (Carl Jung)*

# Resumo

O Problema de Localização de Facilidades (*Facility Location Problem - FLP*) é um dos temas clássicos na Pesquisa Operacional e se propõe a definir os melhores pontos de instalação de  $p$  facilidades para que  $n$  demandas sejam atendidas. O modelo visa minimizar custos ou maximizar algum benefício sob determinadas restrições (de capacidade, tempo, equipe etc). Uma de suas versões, o Problema de Máxima Cobertura (*Maximal Covering Location Problem - MCLP*), tem o objetivo de cobrir a maior demanda possível dentro de um limite preestabelecido (de tempo ou distância). Neste trabalho, o problema do tipo MCLP foi aplicado à realidade do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais, SAMU-BH, com o objetivo de maximizar a cobertura dos chamados atendidos dentro de um tempo de resposta de até oito minutos para as unidades de suporte básico (USBs) e de até dez minutos para as unidades de suporte avançado (USAs). Foram coletados dados dos prontuários referentes às ocorrências de Maio/2016 a Abril/2017, totalizando 29.048 registros. Os dados foram utilizados para a criação de instâncias do problema baseadas no comportamento dos chamados e representam a realidade do estudo de caso. Foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira, adaptado de um modelo da literatura, e mapeados 427 nós de demanda e 1.527 nós candidatos à instalação de facilidades. Os tempos de resposta entre os nós foram calculados pelo aplicativo *GoogleMaps Direction API*. O modelo foi implementado em IBM ILOG CPLEX<sup>®</sup> 12.7.1, em tempos computacionais satisfatórios. Foram construídos três cenários para localização das 26 ambulâncias disponíveis. Considerou-se o remanejamento entre as bases existentes, a localização ótima em novos pontos mapeados e as taxas de ocupação para cada tipo de ambulância conforme níveis de confiança predefinidos. Os resultados foram comparados com o cenário real de localização das bases, vigente em 2017. Houve um aumento de 9% a 25% na taxa de cobertura, que variou conforme parâmetros estabelecidos, e chegou à cobertura de 100% dos chamados com empenho de USBs. Novos cenários também foram testados, com a aquisição de ambulâncias conforme planejamento para o triênio 2018-2020. O resultado apresentou uma cobertura das ocorrências com o empenho de unidades avançadas 36% maior que a atual. No caso das unidades básicas, o tempo de resposta desejado foi reduzido para 6 minutos e a cobertura aumentou em 20%. Uma abordagem multiobjetivo foi apresentada, utilizando o método da Soma Ponderada, *a posteriori*, com os objetivos de aumentar a cobertura total e reduzir o número de bases instaladas. Foram encontradas 25 soluções Pareto-Ótimas, sendo alternativas para a tomada de decisão gerencial.

**Palavras-chave:** Localização de Facilidades. Problema de Máxima Cobertura. Sistemas Inteligentes. Programação Linear Inteira. Otimização mono-objetivo. Otimização multiobjetivo.

# Abstract

Facility Location Problem (FLP) is one of the classic topics in Operational Research. It proposes to define the best installation points of  $p$  facilities with the view to minimize costs or maximize the benefit of serving demands, under some conditions. One of its versions, the Maximum Coverage Location Problem (MCLP), aims to cover the greatest number of possible demands within a pre-established limit (time or distance). In this work, the MCLP was applied to the reality of the ambulance emergency service in the Belo Horizonte city, state of Minas Gerais, Brazil, called SAMU-BH. The target is to maximize the number of calls covered within a response time of up to 8 minutes for basic support units (USBs) and up to 10 minutes for advanced support units (USAs). Data of medical records from May 2016 to April 2017 were collected, resulting in a total of 29.048 occurrences. The data were used to create instances of the problem based on the probabilistic behavior of the calls and represent the reality of the case study. A integer linear programming model was developed, based on the literature review, with 427 demand nodes and 1.527 candidate points for facilities location. The travel times between demand points and facilities were calculate by the GoogleMaps Direction API. The model was run on IBM ILOG CPLEX R 12.7.1 with satisfactory computational times and the solution was compared to the actual base location situation, effective in 2017. Three scenarios were considered: a units reallocation in the current points, a increase in candidate points for facility location and the probabilist version of the model, where a probability  $\alpha$  is used to calculate the covered population that can find an available server. The optimal solutions resulted in a coverage between 9% and 25% greater than the current one. For some solutions, 100% of the basic calls would be covered. New scenarios were also executed, with the acquisition of ambulances according to planning for the triennium 2018-2020. The results presented a coverage of advanced and basic units' attendance 36% and 20% greater than the present day, even with the reduction of basic units response time to 6 minutes. A multi-objective approach, called Weighted Sum Method, aimed at reducing the number of total basis, besides of increasing the coverage. As a result, 25 Pareto-Optimal were found.

**Keywords:** Facility Location Problem. Maximal Coverage Problem. Intelligent Systems. Integer Linear Programming. Mono-objective optimization. Multi-objective optimization.

# Lista de Figuras

Figura 1 – Cobertura das Urgências em Minas Gerais . . . . .	3
Figura 2 – Fluxograma de um atendimento do SAMU . . . . .	4
Figura 3 – Localização aproximada das Bases do SAMU-BH . . . . .	5
Figura 4 – Representação do conceito de dominância no espaço dos objetivos em um problema de minimização . . . . .	37
Figura 5 – Chamados por dia útil . . . . .	54
Figura 6 – Chamados por faixa horária - USAs . . . . .	54
Figura 7 – Chamados por faixa horária - USBs . . . . .	55
Figura 8 – Análise temporal: tendência para a faixa horária 18h-18h59 . . . . .	56
Figura 9 – Nós de Demanda: bairros de Belo Horizonte mapeados . . . . .	64
Figura 10 – Nós Candidatos a Facilidades . . . . .	65
Figura 11 – Remanejamento das USAs após otimização . . . . .	69
Figura 12 – Remanejamento das USBs após otimização . . . . .	69
Figura 13 – Localização atual <i>versus</i> Localização ótima . . . . .	71
Figura 14 – Localização das bases - Cenário 05 . . . . .	75
Figura 15 – Regiões de Indiferença na abordagem ponderada multiobjetivo. . . . .	80
Figura 16 – Conjunto de Pareto . . . . .	80
Figura 17 – Boxplot dos tempos de resposta da Instância 01 . . . . .	83
Figura 18 – Taxas de Cobertura <i>versus</i> Bases Instaladas . . . . .	85

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Taxa de Ocupação - USAs . . . . .	42
Tabela 2 – Taxa de Ocupação - USBs . . . . .	42
Tabela 3 – Mínimo de USAs e USBs para cobertura de um nó . . . . .	43
Tabela 4 – Resultado da cobertura - instância 01 . . . . .	47
Tabela 5 – Atendimentos por USA . . . . .	51
Tabela 6 – Atendimentos por USB . . . . .	52
Tabela 7 – Atendimentos por dia da semana - USAs . . . . .	52
Tabela 8 – Atendimentos por dia da semana - USBs . . . . .	53
Tabela 9 – Atendimentos por Turno - USAs . . . . .	55
Tabela 10 – Atendimentos por Turno - USBs . . . . .	55
Tabela 11 – Atendimentos e População por Regional . . . . .	57
Tabela 12 – População <i>versus</i> Número de chamados . . . . .	58
Tabela 13 – Destino dos pacientes atendidos por uma USA . . . . .	58
Tabela 14 – Destino dos pacientes atendidos por uma USB . . . . .	58
Tabela 15 – Resultado - Cenário 1 <i>versus</i> Cenário 2 . . . . .	68
Tabela 16 – Resultado - Cenário 1 <i>versus</i> Cenário 3 . . . . .	70
Tabela 17 – Resultado com taxa de ocupação - Cenário 1 . . . . .	73
Tabela 18 – Resultado com taxa de ocupação - Cenário 4 . . . . .	73
Tabela 19 – Resultado - Cenário 1 (atual) <i>versus</i> Cenário 5 (otimizado) . . . . .	74
Tabela 20 – Resultado - Cenário 1 (atual, com tempo de resposta das USBs = 8") <i>versus</i> Cenário 6 (otimizado, com tempo de resposta das USBs = 6") . . . . .	76
Tabela 21 – Cobertura das instâncias simuladas - Cenário 1 <i>versus</i> Cenário 3 . . . . .	78
Tabela 22 – Resultado - Conjunto de soluções para o problema ponderado multiobjetivo	81
Tabela 23 – Resultado multiobjetivo para as instâncias simuladas . . . . .	82

# Lista de Quadros

Quadro 1 – Principais estudos: Brasil . . . . .	14
Quadro 2 – Principais estudos: Mundo . . . . .	20
Quadro 3 – Total de chamados por instância gerada . . . . .	43
Quadro 4 – Bairros de maior demanda . . . . .	57
Quadro 5 – Localização das bases em Novembro/2017 . . . . .	62
Quadro 6 – Remanejamento das ambulâncias nas bases existentes - solução ótima	68
Quadro 7 – Localização otimizada das USBs - Cenário 2 . . . . .	71
Quadro 8 – Localização otimizada das USAs - Cenário 2 . . . . .	72
Quadro 9 – Localização otimizada das bases - Cenário 5 . . . . .	75
Quadro 10 – Localização otimizada das bases - Cenário 6-1 . . . . .	76
Quadro 11 – Bases modificadas - Cenário 6-2 . . . . .	77
Quadro 12 – Bases modificadas - Cenário 6-3 . . . . .	77

# Lista de Algoritmos

Algoritmo 1 – Algoritmo para geração de instâncias . . . . .	44
Algoritmo 2 – Algoritmo para cálculo de distância radial . . . . .	46
Algoritmo 3 – Algoritmo para estimativa de cobertura . . . . .	48
Algoritmo 4 – Algoritmo <i>Google Maps Directions</i> . . . . .	49
Algoritmo 5 – Algoritmo para cálculo da cobertura . . . . .	50

# Lista de Abreviaturas e Siglas

DSM	<i>Double Standard Model</i>
FLEET	<i>Facility Location and Equipment Emplacement Technique</i>
FLP	<i>Facility Location Problem</i>
LSCP	<i>Location Set Covering Problem</i>
MALP	<i>Maximum Available Location Problem</i>
MCLP	<i>Maximal Covering Location Problem</i>
PCR	Parada Cardiorespiratória
P-FLEET-MC	<i>Probabilistic Facility Location and Equipment Emplacement Technique model with Multiple Co-location</i>
PL	Programação Linear
PLI	Programação Linear Inteira
PLIM	Programação Linear Inteira Mista
SAMU	Serviço de Atendimento Móvel de Urgência
SCP	<i>Set Covering Problem</i>
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TEAM	<i>Tandem Equipment Allocation Model</i>
TTM	<i>Two-Tier Model</i>
USA	Unidade de Suporte Avançada
USB	Unidade de Suporte Básica

# Sumário

<b>1 – Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa	6
1.2 Objetivos	7
1.2.1 Objetivos Específicos	7
1.3 Motivação	8
1.4 Organização do trabalho	8
<b>2 – Trabalhos Relacionados</b>	<b>9</b>
2.1 Estudos no Brasil	9
2.2 Estudos no Mundo	16
<b>3 – Fundamentação Teórica</b>	<b>21</b>
3.1 O problema de Localização de Facilidades	21
3.1.1 O problema de cobertura	27
3.1.1.1 Problema de Cobertura de Conjuntos - <i>Set Covering Problem (SCP)</i>	28
3.1.1.2 Problema de Máxima Cobertura - <i>Maximal Covering Problem (MCLP)</i>	29
3.2 Conceitos de Probabilidade	33
3.2.1 Distribuição de <i>Poisson</i>	34
3.3 Otimização multiobjetivo	35
3.3.1 Método da Soma Ponderada ( $P_\lambda$ )	37
<b>4 – Metodologia</b>	<b>39</b>
4.1 Delineamento da pesquisa	39
4.2 Fração de ocupação das unidades móveis	40
4.3 Geração de Instâncias	43
4.4 Distâncias entre demandas e facilidades	45
4.5 Tempos de resposta entre demandas e facilidades	46
4.6 Cobertura das Instâncias de Teste	49
4.7 Aspectos Éticos	50
<b>5 – Modelo Matemático</b>	<b>51</b>
5.1 Análise dos dados coletados	51
5.2 Modelo FLEET-IC	59
5.3 Configuração atual	62

5.4	Parâmetros do modelo . . . . .	63
5.4.1	Nós de demanda . . . . .	63
5.4.2	Nós de facilidade . . . . .	64
5.4.3	Outros parâmetros . . . . .	65
<b>6</b>	<b>– Resultados . . . . .</b>	<b>67</b>
6.1	Cenários 01 e 02 . . . . .	67
6.2	Cenários 01 e 03 . . . . .	70
6.3	Cenário 04 . . . . .	72
6.4	Cenários 01 e 05 . . . . .	74
6.5	Cenários 01 e 06 . . . . .	75
6.6	Simulação de cobertura . . . . .	78
6.7	Abordagem multiobjetivo . . . . .	79
6.8	Análise e Discussão . . . . .	83
<b>7</b>	<b>– Conclusão . . . . .</b>	<b>86</b>
7.1	Trabalhos Futuros . . . . .	87
	<b>Referências . . . . .</b>	<b>88</b>
	<b>Apêndices . . . . .</b>	<b>101</b>
	<b>APÊNDICE A – Extensões dos modelos SCP e MCLP . . . . .</b>	<b>102</b>
	<b>Anexos . . . . .</b>	<b>114</b>
	<b>ANEXO A – Parecer Ético . . . . .</b>	<b>115</b>

# 1 Introdução

O campo da Pesquisa Operacional na área da saúde vem ganhando importantes contribuições ao longo dos anos. A gerência dos serviços de saúde torna-se relevante à medida em que se percebe a necessidade de melhorar a eficiência das instituições, sejam elas públicas ou privadas, para uma melhor gestão dos custos, da equipe, dos suprimentos e da qualidade do atendimento prestado. Além disso, o aumento da longevidade e o surgimento de novas doenças nos últimos anos faz com que os gestores dessa área direcionem esforços não só ao cuidado dos pacientes mas também à prevenção e controle de enfermidades.

Entre os principais temas de estudo nessa área estão aqueles relacionados ao planejamento de tarefas (*scheduling*), como a programação de turnos de enfermeiros (GRANO; MEDEIROS; EITEL, 2009), o gerenciamento e agendamento de horários para atendimento ambulatorial e hospitalar (ROHLEDER et al., 2011) e a programação de consultas e cirurgias (GARTNER; KOLISCH, 2014) (PERSSON; PERSSON, 2009). Outros problemas estudados envolvem o planejamento de tratamentos, como a diálise e a radioterapia (WU; ZHU, 2001), o transporte de pacientes (BEAUDRY et al., 2010), a alocação de leitos e ambulâncias (BACHOUCH; GUINET; HAJRI-GABOUJ, 2012) (ANDERSSON; VÄRBRAND, 2007) e a gestão de medicamentos (JACOBSON et al., 2006).

Segundo Priyan (2017) existem pelo menos três razões pelas quais a Pesquisa Operacional tem um papel fundamental na saúde. Primeiro, ela pode contribuir para a melhoria dos programas de assistência médica e prevenção existentes. Além disso, é uma ferramenta de avaliação da viabilidade de novas estratégias ou intervenções em grupos específicos da sociedade. E também pode ser usada para defender mudanças nas políticas públicas vigentes.

Entende-se por políticas públicas o conjunto de ações e metas governamentais com o objetivo de atender às necessidades básicas da população no que tange educação, saúde, transporte, segurança, dentre outros. No Brasil, as primeiras leis sociais foram criadas no final do século XIX, mas só com as reivindicações trabalhistas advindas do processo de industrialização que os primeiros projetos de proteção social ganharam mais importância. No quesito saúde, no início do século XX foram criadas ações pontuais para o controle de epidemias e doenças mais graves. Na década de 30 foi criado o Ministério da Educação e Saúde Pública. Somente em 1953 a saúde e a educação são separadas, nascendo assim o Ministério da Saúde, que foi incorporado ao INPS (Instituto Nacional de Previdência Social) durante o período militar.

Neste momento, o sistema de saúde brasileiro não possuía uma estrutura sólida e

adequada à realidade e à demanda do país. Somente em resposta ao movimento social de reforma sanitária, iniciado no final dos anos 70, e com a promulgação da Constituição Federal, em 1988, foi criado o SUS (Sistema Único de Saúde), seguindo os princípios de universalidade, integralidade e igualdade.

A saúde é direito de todos e dever do Estado, garantido mediante políticas sociais e econômicas que visem à redução do risco de doença e de outros agravos e ao acesso universal e igualitário às ações e serviços para sua promoção, proteção e recuperação. ([CONSTITUIÇÃO FEDERAL, 1988](#), art. 196).

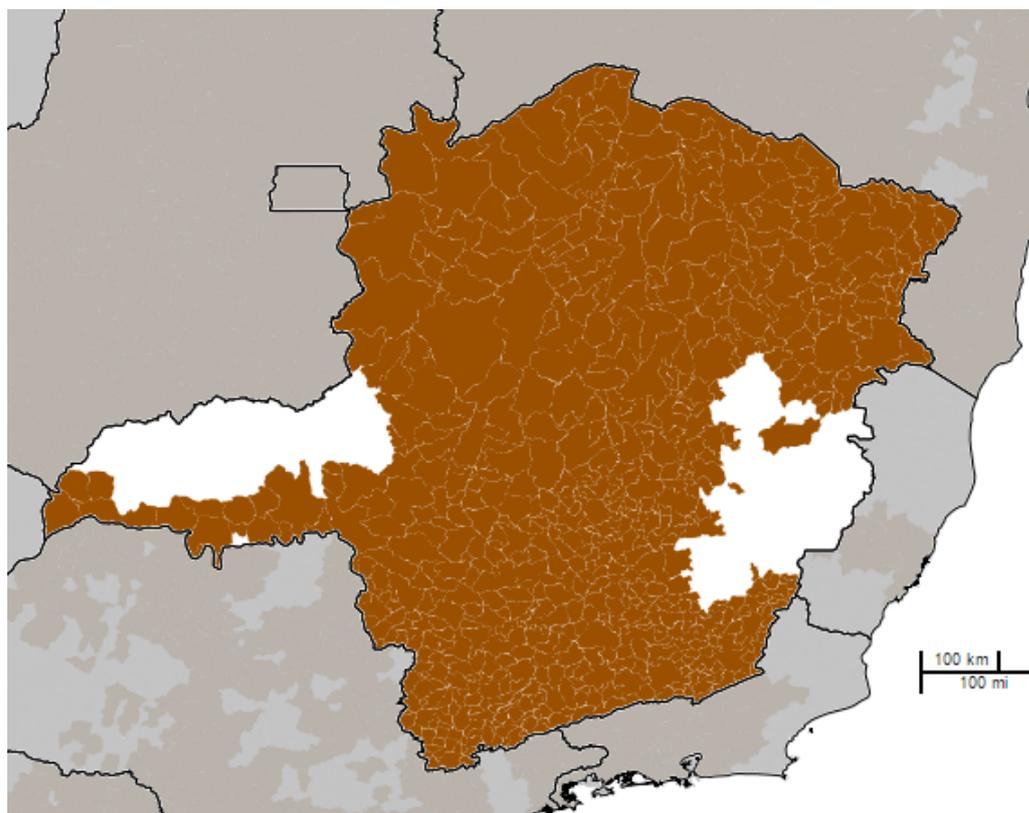
O sistema público de saúde brasileiro é pautado nos conceitos de descentralização, no qual a responsabilidade em garantir seu funcionamento está dividido entre os três níveis (União, Estados e Municípios); de atendimento integral, ao se preocupar com a promoção, proteção e recuperação da saúde de toda a população; e no conceito de participação popular, através dos Conselhos de Saúde, compostos por representantes de entidades e movimentos sociais de usuários do Sistema Único de Saúde. Entre os serviços oferecidos atualmente pelo SUS estão a Farmácia Popular, o Centro de Testagem e Acolhimento em DST/AIDS, as UBSs (Unidades Básicas de Saúde), as UPAs (Unidades de Pronto Atendimento), o serviço de Vacinação e o SAMU (Serviço de Atendimento Móvel de Urgência).

O SAMU está entre os serviços considerados pré-hospitalares, ou seja, aqueles realizados antes da chegada do paciente ao hospital. É um serviço gratuito de ajuda médica aos cidadãos acometidos por urgências e emergências, sejam clínicas ou traumáticas, regulamentada em 2002 pela Portaria 2.048 do Ministério da Saúde.

As unidades de transporte podem ser ambulâncias, motolâncias, ambulanchas ou aeromédicos e estão distribuídas em pontos das cidades em que há cobertura do serviço, chamados de bases. No caso das ambulâncias, que correspondem a 92% da frota, existem dois tipos de configuração: as USBs (Unidades de Suporte Básico), estruturadas para garantir os primeiros procedimentos de socorro, e as USAs (Unidades de Suporte Avançado), compostas por uma UTI móvel. As bases deverão possuir ambientes de apoio com quartos para descanso dos profissionais, banheiros, estacionamento coberto para ambulâncias, copa, sala de estar e almoxarifado, conforme composição mínima prevista pelo [Ministério da Saúde \(2014\)](#).

Segundo [Ministério da Saúde \(2017\)](#), em 2017, 79,37% da população brasileira contava com a cobertura do SAMU, o que corresponde a 3.385 dos 5.570 municípios. Em Minas Gerais, o serviço atendia a 73,26% da população e era oferecido em 63% dos municípios, conforme as áreas escuras do mapa na [Figura 1](#). Quatro territórios de desenvolvimento do Estado se encontravam defasados de cobertura do serviço. São eles: Triângulo Norte, Vale do Aço, Vale do Rio Doce e Caparaó.

Figura 1 – Cobertura das Urgências em Minas Gerais

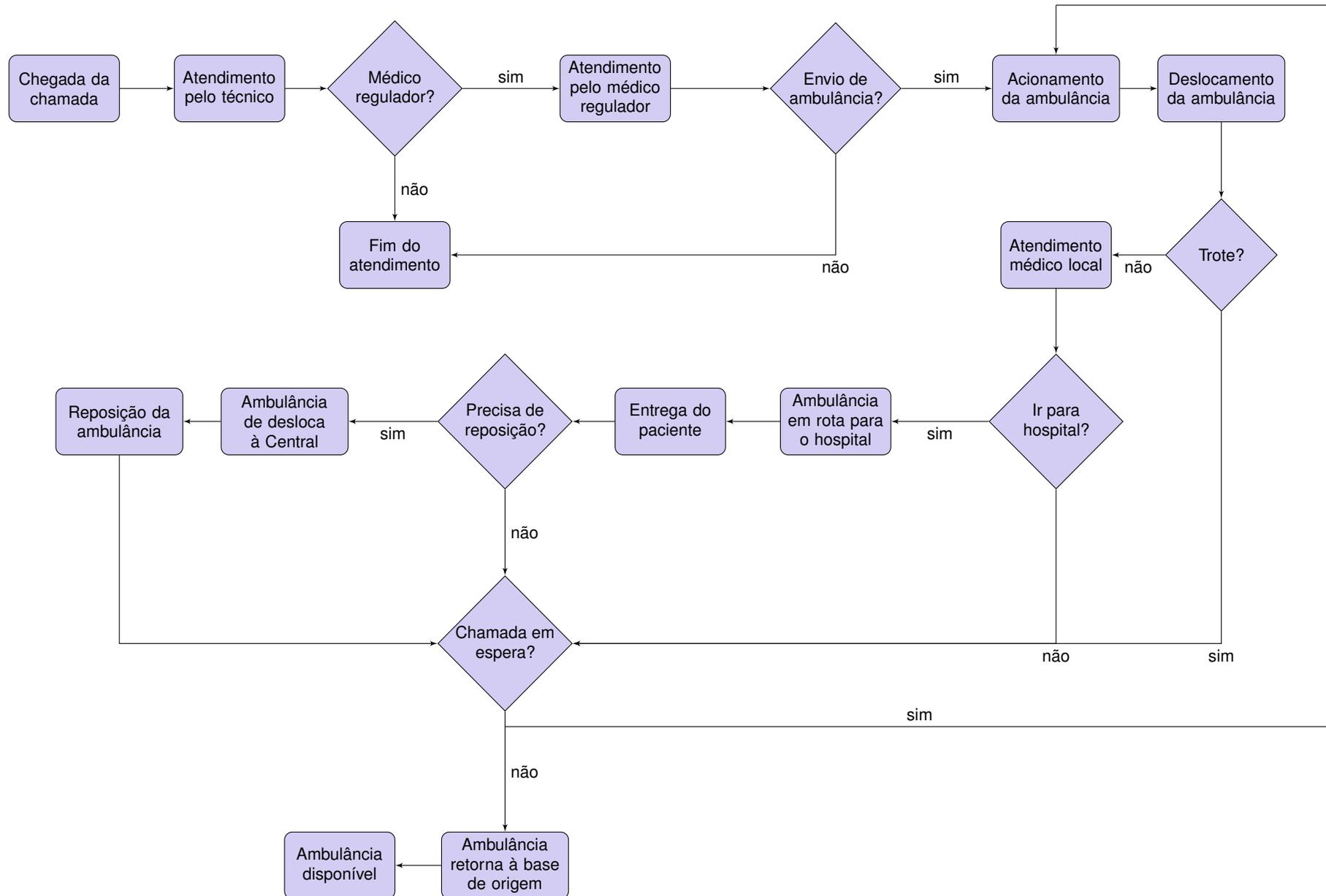


Fonte: [Ministério da Saúde \(2017\)](#)

O SAMU-BH foi criado em 2003 pela prefeitura municipal e, na época, contava com uma Unidade de Suporte Avançado e duas Unidades de Suporte Básico, além das unidades de resgate do Corpo de Bombeiros. Dados de Setembro de 2015 a Agosto de 2016 indicam que foram realizados, em média, 6.800 atendimentos por mês. Em 2017, o serviço contava com seis Unidades de Suporte Avançado e 21 Unidades de Suporte Básico, atendendo ao recomendado pela [Portaria nº 2.048 do Ministério da Saúde \(2002\)](#), em que se prevê uma USB a cada 100 a 150 mil habitantes e uma USA a cada 400 a 450 mil habitantes.

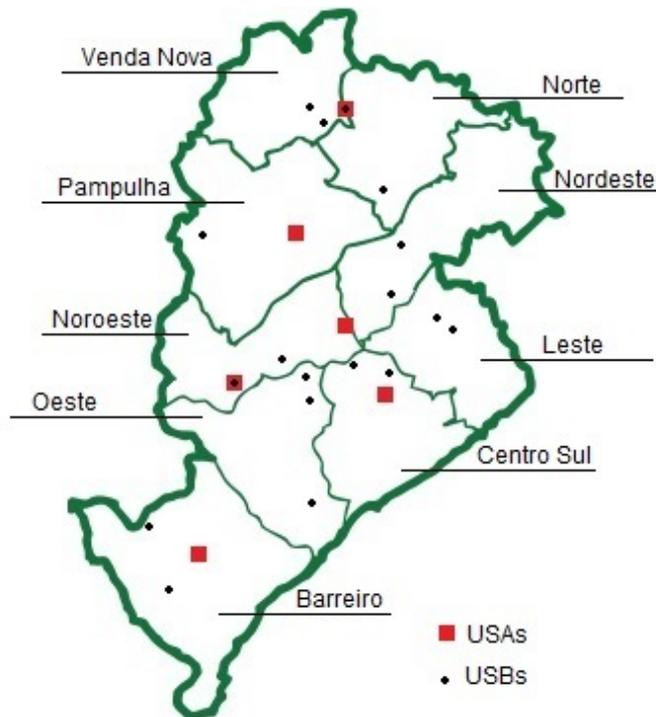
As equipes que trabalham no SAMU são compostas por socorristas, auxiliares de enfermagem, enfermeiros e médicos, que são acionados mediante a necessidade de cada chamado, conforme [Figura 2](#). O socorro se inicia através de uma ligação ao número pré-hospitalar móvel 192, recebida em uma Central de Regulação que funciona 24 horas por dia. A partir das informações iniciais coletadas, a ligação é transferida para um médico regulador que fará o diagnóstico da situação, avaliará o grau de urgência e aconselhará o usuário. Caso necessário, ele acionará uma equipe que fará o atendimento no local da ocorrência (residências, locais de trabalho, vias públicas etc), com base nos recursos disponíveis ([MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2006](#)). Quando uma ambulância é acionada para o atendimento de uma vítima ela é considerada empenhada. Ou seja, o empenho da ambulância consiste no seu despacho para o atendimento de um chamado.

Figura 2 – Fluxograma de um atendimento do SAMU



As 27 ambulâncias do SAMU-BH disponíveis para atendimento estão alocadas em 22 bases na capital. Cada base pode receber uma ou mais unidades de um mesmo tipo ou de tipos diferentes. A distribuição vigente em 2017 está ilustrada na [Figura 3](#). Quando uma ambulância é empenhada ela se desloca de um desses pontos indicados no mapa até o local onde se encontra a vítima.

Figura 3 – Localização aproximada das Bases do SAMU-BH



Fonte: Autora, 2017

De acordo com a localização passada no registro do chamado, é feita a seleção da ambulância mais próxima à vítima com a estrutura necessária para realizar o atendimento. Quanto melhor a distribuição das bases pelo território maiores serão as chances de uma ambulância chegar em tempo hábil para prestar socorro em qualquer parte do município. Portanto, a escolha das melhores posições de cada ambulância está diretamente relacionada com a melhor prestação de serviço e gestão dos recursos públicos.

O problema de Localização de Facilidades (*Facility Location Problem*) é um dos temas clássicos em Pesquisa Operacional e se resume na definição dos melhores pontos de instalação de determinada facilidade para atender à demanda local, com o objetivo de minimizar custo ou tempo, maximizar os atendimentos, dentre outros objetivos, sob determinadas restrições (de capacidade, tempo, equipe etc). Neste trabalho serão apresentados estudos sobre esse problema aplicado ao setor de saúde, especificamente ao SAMU-BH, para otimização da localização das bases e ambulâncias de atendimento móvel pré-hospitalar. Os resultados poderão auxiliar o processo de tomada de decisão dos gestores públicos para uma melhoria no nível de serviço à população, contribuindo, também, na

gestão de seus custos e orçamentos.

## 1.1 Justificativa

Segundo [Paiva \(2007\)](#), o Ministério da Saúde preconiza que o deslocamento da USB de sua base até o local da vítima não deve ultrapassar nove minutos e, no caso da USA, o tempo máximo deve ser de doze minutos. Nas pesquisas realizadas para o desenvolvimento deste trabalho, não foram encontradas diretrizes federais que estipulassem o tempo de resposta ideal para o atendimento móvel de urgência. Nos Estados Unidos, alguns órgãos estabeleceram, no setor privado, o padrão de oito minutos para até 90% dos casos e, em outros casos, como na Califórnia, de doze a quinze minutos para o mesmo percentual ([EMS World, 2004](#)).

A regulamentação americana para os serviços médicos de urgência estabelece que 95% das solicitações em área urbana devem ser atendidas em, no máximo, 10 minutos, sendo este período estendido para 30 minutos para a área rural (Ball & Lin, 1993). Nos casos dos serviços de ambulâncias das cidades de Londres e Montreal, 95% das solicitações devem ser servidas em 14 e 10 minutos, respectivamente, e 50% e 70% das solicitações devem ser servidas em 08 e 07 minutos, respectivamente (Geandreau et al., 2001; Galvão et al., 2003a). No Brasil, entretanto, não há legislação específica que determine limitações para os tempos de resposta. ([TAKEDA; WIDMER; MORABITO, 2004](#), p. 40).

Independente de qual seja o intervalo, é natural deduzir que, em casos de urgência e emergência, quanto mais rápido a vítima começar a receber atendimento, maiores serão as chances de sucesso e, em casos de risco de morte, maiores serão as chances do paciente sobreviver.

Segundo o Colégio Americano de Cirurgiões, reconhecido a nível mundial como referência no estudo do trauma, as chances de uma vítima politraumatizada sobreviver podem aumentar em até 80% se o tempo transcorrido entre o acidente e o atendimento hospitalar definitivo for inferior a 60 min. Este princípio, denominado a hora dourada do trauma, tem guiado a organização e implementação dos serviços de emergência no mundo inteiro. Desta forma, o fator tempo assume um papel importante no resgate de vítimas de acidentes automobilísticos (...).([RIBAS, 2011](#), p. 10).

Ainda em relação a traumas, em alguns casos o conceito “minutos de platina” é comumente utilizado no atendimento pré-hospitalar e refere-se aos dez minutos iniciais após o acidente, cruciais em alguns casos, quando, por exemplo, há hemorragia ([VERAO, 2013](#)). Quanto à parada cardiorespiratória (PCR), ocorrência clínica que representa 30% dos óbitos no Brasil, o índice de sobrevivência pode chegar a 75% caso o intervalo entre o evento e a reanimação do paciente ocorra em quatro minutos, a 15% se ocorrer entre quatro e doze minutos e é de apenas 5% após quinze minutos ([ZANINI; NASCIMENTO;](#)

BARRA, 2006). Um estudo realizado por [Morais \(2007\)](#) apurou o tempo de resposta médio às ocorrências de PCR atendidas pelas USAs do SAMU-BH em 2005: dez minutos para a cidade de Belo Horizonte e dezoito minutos para a região metropolitana.

Um dos principais critérios de medição de desempenho do serviço prestado pelo SAMU é o tempo necessário para o socorro da vítima. Uma das formas de medir sua qualidade está no cálculo do tempo decorrido entre a ligação gerada à Central de Regulação e a finalização do atendimento pré-hospitalar (seja com a alta do paciente no local da ocorrência ou após o encaminhamento dele ao hospital). Esse intervalo é dividido em três tempos distintos ([FITZSIMMONS, 1971](#) apud [SILVA, 2010](#)):

- tempo de espera: tempo entre o chamado recebido na Central de Regulação e o efetivo despacho de uma ambulância. Essa espera geralmente acontece quando todas as ambulâncias estão em atendimento e forma-se uma fila de espera.
- tempo de resposta: intervalo de tempo entre o recebimento da ocorrência na Central de Regulação até a chegada da equipe no local onde se encontra a vítima. São contabilizados o tempo de espera e o tempo de transporte da ambulância a partir do seu empenho.
- tempo de atendimento: do início do atendimento da equipe da unidade móvel até a finalização, seja com a alta do paciente ou com a sua transferência para uma centro médico / hospitalar. No momento em que se encerra o tempo de resposta, dá-se início ao tempo de atendimento.

Portanto, o desenvolvimento de ferramentas que auxiliem a tomada de decisão em serviços de saúde é importante para que o planejamento de um sistema de atendimento pré-hospitalar possa ser o mais eficiente possível, respeitando as limitações e características do município. A Pesquisa Operacional possui instrumentos suficientes para contribuir com a otimização dos processos que afetam a duração dos tempos descritos e, assim, aumentar a qualidade do serviço prestado.

## 1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo matemático que possibilite uma nova configuração de bases e ambulâncias do SAMU-BH que contribua para a redução do tempo de resposta às ocorrências atendidas, maximizando a taxa de cobertura dos chamados.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

A partir das soluções encontradas, serão simulados os seguintes cenários:

- o posicionamento atual das bases e ambulâncias;

- um cenário com a realocação das ambulâncias existentes nas bases atuais;
- um cenário com um novo posicionamento das bases para as ambulâncias existentes;
- um cenário que considera uma fração de ocupação das unidades;
- um cenário com um maior número de ambulâncias;

Também será realizada uma abordagem multicritério, com dois objetivos: aumentar a cobertura total aos chamados e reduzir o número de bases instaladas. Entende-se por cobertura o chamado que possui um tempo de resposta igual ou inferior aos limites preestabelecidos pela gerência em saúde, detalhados no [Capítulo 5](#).

### 1.3 Motivação

Muitas instituições públicas e privadas ainda são carentes de estrutura e condições financeiras para investir em gestão e em técnicas de otimização de seus serviços. Este trabalho contribui com a comunidade acadêmica através de novos estudos e abordagens de um problema clássico na literatura. Por se tratar de um estudo de caso com a utilização de dados reais foi possível auxiliar na prática o setor público a obter mais eficiência e oferecer um melhor serviço à sociedade.

### 1.4 Organização do trabalho

No [Capítulo 2](#), será mostrado um resumo dos principais trabalhos em otimização em serviços de emergência e localização de facilidades realizados no Brasil e no Mundo. No [Capítulo 3](#), serão detalhados os principais conceitos envolvendo o Problema de Localização de Facilidades, os modelos clássicos e outras versões desenvolvidas encontradas na literatura. Serão apresentados, também, conceitos de Estatística e Probabilidade e de Otimização Multiobjetivo, necessários para o desenvolvimento do trabalho. Os materiais e métodos que foram utilizados no estudo, com o detalhamento do processo de coleta de dados, desenvolvimento das técnicas para a solução do problema e o processo de criação das instâncias de teste serão explicados no [Capítulo 4](#).

No [Capítulo 5](#) será apresentado o estudo estatístico dos dados coletados referentes aos atendimentos realizados pelas unidades móveis durante doze meses e definido o modelo matemático para o estudo de caso do SAMU-BH. Os resultados alcançados através de métodos exatos e o cálculo da cobertura das instâncias de teste serão apresentados e analisados no [Capítulo 6](#). No [Capítulo 7](#), será apresentada a conclusão do trabalho e os caminhos identificados para continuidade em projetos futuros. Todas as referências utilizadas, apêndices e anexos estão presentes no final do documento.

## 2 Trabalhos Relacionados

Nesta seção, serão apresentados alguns estudos já realizados na área de localização de facilidades em serviços de emergência. Na [Seção 2.1](#) o foco será dado aos trabalhos publicados com estudos de caso para os Serviços de Atendimento Móvel de Urgência no Brasil. Serão avaliados os modelos considerando o tipo de serviço, demanda e restrições características do País e das políticas públicas governamentais. Na [Seção 2.2](#) serão apresentados alguns trabalhos realizados em todo o mundo para resolução de problemas de localização de facilidades contemplando a diversidade das técnicas já utilizadas, não se limitando àqueles com características similares às deste trabalho.

### 2.1 Estudos no Brasil

Para problemas triviais, como localização de facilidades não-capacitados ou que possuam uma base de dados mais simples, os métodos exatos são eficientes e possuem como vantagem o conhecimento da solução ótima ([HOLMBERG, 1999](#)) ([TRAGANTALERNGSAK; HOLT; RÖNNQVIST, 2000](#)) ([HANSEN; KOCHETOV; MLADENOVI, 2004](#)) ([CAMARGO; JR; LUNA, 2008](#)) ([LI; SVENSSON, 2016](#)). Nesses casos, por se tratar de um problema de localização que pode ser modelado usando variáveis de decisão booleanas para indicar se uma facilidade é ou não é instalada em determinado ponto e uma demanda é ou não é atendida por uma dada facilidade, em geral são utilizados os modelos de PLI (Programação Linear Inteira) ou PLIM (Programação Linear Inteira Mista).

Foram encontrados na literatura estudos em que se utilizou a Programação Linear Inteira para a minimização dos custos de instalação de facilidades no setor público de saúde. [Marques e Queiroz \(2014\)](#) adaptaram o modelo UBUL (*Upper-Bound Unavailability Location*) para reduzir o número de variáveis do modelo e conseguir menores tempos computacionais. O objetivo foi determinar o menor número de ambulâncias e estações necessárias para cobrir determinada demanda, problema conhecido como *set covering*, detalhado no [Capítulo 3](#). Foi considerada uma fração máxima de ocupação por ambulância em uma rede com 79 nós. Não foram considerados custos para instalação das bases ou aquisição de ambulâncias. Dessa forma, a função objetivo foi simplificada para a minimização do número de ambulâncias utilizadas. O modelo não foi aplicado a um problema real, sendo utilizado apenas em instância teste. O tempo de deslocamento também não foi considerado e o critério de cobertura utilizado baseou-se na distância em milhas entre base e demanda.

[Filippi et al. \(2012\)](#) utilizaram PLI para determinar os melhores locais de instalação de UBS (Unidades Básicas de Saúde) na cidade de Sorocaba/SP, em uma abordagem multiperíodo. Nesse caso, as unidades são pontos fixos e os pacientes se deslocam até

a facilidade para serem atendidos. Foram considerados seis cenários equiprováveis com variação da demanda em até 20% para mais e menos em relação aos números reais. Como se trata da construção de uma facilidade, foram considerados custos de abertura, fechamento, manutenção e turnos extras. O critério de cobertura utilizado também foi relativo à distância euclidiana, não podendo ultrapassar os 5 km. Não foram utilizados dados reais para modelagem. Os dados das instâncias foram estimados com base em documentos disponíveis pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e pela prefeitura municipal. Foram mapeados 189 pontos candidatos a instalação de UBSs. Neste problema, considerou-se que toda a população da cidade utiliza o sistema público. Com isso, o número de UBSs necessárias tende a estar superestimado.

Na maioria dos casos reais, em que as facilidades disponíveis possuem limite de capacidade e os parâmetros envolvidos na modelagem são complexos, os métodos exatos levam a uma complexidade intratável e é necessário usar métodos não-exatos (heurísticos) para que seja possível encontrar soluções de boa qualidade, não necessariamente ótimas, em tempo hábil.

[Iannoni e Morabito \(2006\)](#) utilizaram o algoritmo genético básico integrado ao modelo hipercubo para otimizar a área de cobertura de cada ambulância localizada na Rodovia Presidente Dutra. [Figueiredo e Lorena \(2005\)](#) aplicaram o Algoritmo Genético Construtivo (AGC) para maximizar a demanda coberta pelo SAMU de São José dos Campos/SP. Em ambos os casos os testes computacionais foram realizados em instâncias pequenas, com seis e cinco ambulâncias, respectivamente e dez pontos de demanda. Por isso não é possível tirar conclusões a respeito da eficiência da técnica em instâncias do porte deste estudo de caso para o SAMU-BH.

[Andrade e Cunha \(2014\)](#) utilizaram a metaheurística Colônia Artificial de Abelhas para encontrar a melhor localização das bases e alocação de ambulâncias multiperíodo com o objetivo de maximizar sua cobertura e minimizar as realocações no SAMU-SP. Os testes foram realizados para a localização em bases fixas e móveis de 140 ambulâncias para 96 pontos de demanda. Como os autores não tiveram acesso à quantidade de chamados históricos por tipo de ambulância, foi considerado apenas um tipo de unidade móvel e, portanto, apenas um limite de cobertura. Os resultados encontrados foram satisfatórios e indicam que a realocação de seis bases levaria a uma diminuição de 59% no tempo de resposta. A Busca Tabu foi utilizada em um problema de localização de facilidades com restrições de capacidade e fonte única aplicado em instâncias teste ([PRADO, 2007](#)). A quantidade máxima de nós de facilidade se limitou a cinquenta, com quinhentos nós de demanda. Os resultados indicam que Busca Tabu, apesar de pouco utilizada para este tipo de problema, pode trazer resultados satisfatórios se comparado a outras metaheurísticas.

Quando o trabalho envolve um estudo de caso é necessário que as características e especificidades do cenário que se deseja modelar sejam bem compreendidas. Em muitas

situações reais, os parâmetros do problema possuem um alto grau de incerteza e não é possível conhecer o seu valor exato antecipadamente, pois depende de condições que não podem ser controladas. Em alguns casos, é possível simplificar a modelagem, tornando-a determinística. Por outro lado, ao ignorar as incertezas, os resultados ótimos encontrados podem não ter nenhum significado prático para a solução do problema. Na literatura são encontradas algumas técnicas que ajudam a lidar com as incertezas do problema e garantir soluções mais próximas da realidade. Algumas delas serão detalhadas nos parágrafos abaixo.

[Marques \(2016\)](#) usou a otimização robusta em PLI para um problema monoobjetivo de localização de ambulâncias do Corpo de Bombeiros da cidade de Catalão/GO, com o objetivo de encontrar soluções menos sensíveis à variação no tempo de atendimento dos chamados. Foram considerados até 84 nós de demanda para a solução de um problema de *set covering*. Neste cenário, os resultados se mostraram bastante sensíveis à variação do tempo de atendimento. Para problemas multiobjetivo também foram encontrados resultados satisfatórios na busca de soluções robustas em algoritmos evolutivos ([BORGES, 2017](#)). O objetivo da otimização robusta é encontrar uma solução que permaneça viável para qualquer parâmetro considerado incerto dentro do conjunto de incertezas. Mais informações sobre modelos robustos e aplicações em outros contextos podem ser encontradas em [Bertsimas e Sim \(2004\)](#).

Alguns autores utilizaram o modelo hipercubo, ferramenta analítica e descritiva que leva em consideração a característica aleatória da distribuição dos chamados ao longo dos dias. Apesar de não ser um modelo de otimização, ele fornece medidas de desempenho dentro dos cenários sugeridos para serem comparados com o real. Esse modelo é baseado nos resultados de teoria de filas espacialmente distribuídas e aproximações Markovianas e envolve um sistema de equações lineares cuja complexidade é da ordem de  $O(2^n)$ , sendo  $n$  o número de servidores (ambulâncias, por exemplo). Cada equação é considerada um estado do sistema que informa a probabilidade de um servidor estar livre ou não em certo instante de tempo.

No Brasil, foram encontrados estudos para os SAMUs de Ribeirão Preto, Campinas, São José dos Campos e Duque de Caxias, e também para o serviço em rodovias federais, como o Anjos do Asfalto, em sua maioria utilizando o Hipercubo em conjunto com métodos exatos. ([CHIYOSHI; GALVÃO; MORABITO, 2000](#)), ([MENDONÇA; MORABITO, 2000](#)), ([TAKEDA; WIDMER; MORABITO, 2004](#)), ([BARRETO; ALEXANDRINO; COELHO, 2016](#)), ([IANNONI; MORABITO, 2006](#)), ([SOUZA et al., 2014](#)), ([FIGUEIREDO; LORENA, 2005](#)). Nesses estudos, o número de servidores considerados foi de, no máximo, 10. Conforme destacado por [LUQUE \(2006 apud SOUZA et al., 2010\)](#) "o número de estados do modelo aumenta exponencialmente com o aumento do número de ambulâncias (...) Como consequência há um aumento exponencial ao número de variáveis e equações de balanço do

modelo hipercubo, dificultando sua resolução". Mais informações sobre o modelo hipercubo podem ser encontradas em [Larson \(1974\)](#).

Entende-se por simulação a imitação dos processos e operações que acontecem no mundo real e é utilizada para medir a performance de um sistema modelado. Na Simulação de Eventos Discretos (SED), o estado do sistema muda somente quando acontece um evento e, por isso, podem ser modelados como filas de espera. A SED foi a alternativa escolhida em três estudos com abordagem estocástica do problema de localização de facilidades no SAMU-BH. [Jardim e Conceição \(2004\)](#) trataram o problema de localização de facilidades para minimização da distância percorrida pelas ambulâncias. Foram considerados 47 nós de demanda e quinze pontos candidatos a instalação de facilidades. Foram coletados dados reais de atendimento do serviço móvel em um período de 76 dias.

[Silva \(2010\)](#) utilizou um banco de dados maior, com informações de outubro de 2006 a agosto de 2009, e utilizou as informações a partir de dezembro de 2008 para a simulação dos eventos. O tempo de resposta foi calculado a partir da estimativa de uma velocidade média conforme o horário de empenho. No período de realização dos testes, o serviço contava com cinco USAs e dezessete USBs localizadas em vinte pontos da cidade. A partir dos dados coletados em 2009, não houve alterações significativas no número de empenhos realizados se comparados com as informações coletadas para este estudo de caso. [Junior \(2011\)](#), utilizando dados semelhantes, desenvolveu um modelo matemático de minimização dos custos envolvidos na instalação de uma base, considerando um, nove e 71 nós de demanda. No período do estudo, o SAMU-BH contava com cinco USAs e vinte USBs, responsáveis na época por 95% dos atendimentos, localizadas em 22 bases. O autor utilizou ferramentas de otimização em conjunto com simulação e conseguiu uma redução máxima de 29% no tempo de resposta. É importante ressaltar que hoje em dia as negociações de instalação de bases não envolvem mais custos de ativação, uma vez que são feitas via doação de espaço pelos estabelecimentos parceiros.

Apesar de ser uma tarefa complexa, os resultados apresentados apontam que a simulação pode agregar ao processo de tomada de decisão em sistemas dinâmicos influenciados por eventos de natureza aleatória. Trata-se de uma forma eficiente de testar alternativas ao cenário atual na localização de facilidades de serviços de emergência.

Ao agrupar informações qualitativas e quantitativas de determinado cenário, a Lógica Nebulosa, ou Lógica *Fuzzy*, consegue bons resultados em campos nos quais há presença de ambiguidade, imprecisão (característicos de um processo intuitivo) e incerteza. Ao contrário da Lógica Booleana, na qual uma variável pertence ou não a um conjunto (assumindo os valores 0 ou 1), a Lógica *Fuzzy* trabalha com a noção de pertinência, ou seja, um elemento pode pertencer menos a um conjunto do que outro, os limites entre verdadeiro e falso não são bem definidos (admite-se o que se chama de verdade parcial). Em localização de facilidades, esse conceito pode ter importante utilização na definição de cobertura. Dado,

por exemplo, um tempo limite  $R$ , em minutos, para que uma região  $i$  seja considerada atendida ( $x_i = 1$ ) por uma ambulância  $j$  do SAMU, tal que  $R = 10$ . Pela Lógica Booleana, se o tempo entre a demanda e a facilidade  $t_{ij}$  for de 9,9 minutos,  $x_i = 1$ . Caso  $t_{ij}$  seja 10,1 minutos,  $x_i = 0$ . A Lógica Fuzzy proporciona uma certa relaxação dessa variável, que pode assumir valores infinitos intermediários entre 1 e 0, dependendo do quanto maior o parâmetro tempo for em relação a  $R$ .

Goudard et al. (2014) utilizaram a técnica, com o apoio da geolocalização e de métodos exatos, para definir a melhor alternativa de localização para instalação de uma Unidade Básica de Saúde em Joinville/SC, levando também em consideração aspectos subjetivos das variáveis econômica, social e ambiental de cada ponto, como geração de emprego, renda média da população, densidade populacional, impacto biótico, satisfação dos moradores, geração de resíduos etc. No estudo realizado por Pereira et al. (2013) essa técnica é usada para identificar os bairros com alto risco de acidentes de trânsito em João Pessoa/PB para estabelecer um grau de prioridade de intervenção do poder público com, por exemplo, instalações de novas bases do SAMU. Kosko (1992) apresenta um interessante trabalho sobre o uso da técnica junto com a de redes neurais.

A integração do Sistema de Informações Geográficas (SIG) na solução de problemas de localização de facilidades permite a criação de um banco de dados georreferenciado, com informações relativas à distribuição espacial dos pontos de demanda, dos locais candidatos à instalação das facilidades e da combinação desses com outros conjuntos de dados de diversas fontes sobre a região. Ele foi utilizado no planejamento e gestão na área de saúde por Carvalho Neto (2008) e Almeida e Barros Filho (2014) para o SAMU de João Pessoa/PB, com estudos para roteirização das ambulâncias, em 2007, e na identificação de áreas com maiores índices de agravos, em 2011, respectivamente.

Bôas (2015) utilizou o geoprocessamento na distribuição das ocorrências de agressão física ou com arma (branca ou de fogo) atendidas pelo SAMU, em 2012 e 2013, nas cidades de Feira de Santana/BA e Rio Claro/SP. Oliveira (2008) analisou a posição das bases das unidades do SAMU-BH e a distribuição das ocorrências atendidas em Outubro de 2005 a partir da análise dos centros de massa de cada região. Ao revisar estudos de geolocalização, Goudard et al. (2014) indica que, por ser capaz de integrar informações espaciais, o SIG torna-se uma alternativa ao PLIM, principalmente em problemas não-capacitados, através do SIG-T (SIG aplicados aos Transportes) que utiliza métodos heurísticos para a busca da solução (MAPA; LIMA, 2005 apud GOUDARD et al., 2014), ou como *software* de apoio, com a vantagem de possuir uma ótima interface gráfica, para problemas mais complexos.

No Quadro 1 estão listados os principais autores brasileiros que trataram o problema de localização de facilidades em serviço de emergência, com ênfase aos estudos de caso com os SAMUs que forneceram informações referentes à base de dados utilizada, para possível comparação nas seções posteriores.

Quadro 1 – Principais estudos: Brasil

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Publicação</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Técnica</b>	<b>Base de dados</b>
(JARDIM; CONCEIÇÃO, 2004)	Localização de unidades de resgate em Belo Horizonte.	Anais do XXXVI SBPO	Minimizar a distância total percorrida.	P-mediana via <i>Logware</i> .	De 01 a 15 ambulâncias. 47 nós de demanda. 2021 eventos - 76 dias.
(FIGUEIREDO; LORENA, 2005).	Localização de Ambulâncias: Uma aplicação para a cidade de São José dos Campos – SP.	Anais do Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto	Maximizar a demanda coberta.	Heurística AGC (modelo TEAM).	05 ambulâncias. 25 nós de demanda. <i>Não informado se teve acesso a dados históricos.</i>
(SILVA, 2010)	Análise do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) de Belo Horizonte via simulação e otimização.	Dissertação de mestrado – Engenharia de Produção (UFMG)	Minimizar tempo de resposta.	Simulação (software Arena) e otimizador Opt-Quest.	23 ambulâncias. Coordenadas aleatórias para a demanda ( <i>não informada a quantidade</i> ). Dados coletados de dezembro 2008 a agosto de 2009.
(SOUZA, 2010)	Análise da configuração de SAMU utilizando modelo hiper-cubo com prioridade na fila e múltiplas alternativas de localização de ambulâncias.	Tese de Doutorado – Engenharia de Produção (UFSCAR)	Testar a hipótese de que a distribuição dos chamados e dos serviços pode variar nos diferentes períodos do dia.	Modelo hiper-cubo estendido / simulação.	10 ambulâncias. 05 nós de demanda. <i>Não informado se teve acesso a dados históricos.</i>

<b>Autor</b>	<b>Título</b>	<b>Publicação</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Técnica</b>	<b>Base de dados</b>
(JUNIOR, 2011)	Um estudo para redução do tempo de resposta do SAMU de Belo Horizonte através da realocação das bases de operação.	Dissertação de mestrado – Engenharia de Produção (UFMG)	Otimizar a localização das bases de operação do sistema.	Otimização linear inteira mono-objetivo / simulação.	25 ambulâncias. 01, 09 e 71 nós de demanda. 70706 chamados de 01/01/08 a 13/09/09.
(ANDRADE; CUNHA, 2014)	Modelo de apoio à decisão para um problema de posicionamento de bases, alocação e realocação de ambulâncias em centros urbanos: estudo de caso no município de São Paulo.	TRANSPORTES, 22(2), 34-50	Maximização de probabilidade de atendimento de um determinado chamado dentro de um tempo máximo de cobertura predefinido.	Algoritmo de colônia artificial de abelhas.	140 ambulâncias. 96 pontos de demanda. <i>Não informado se teve acesso a dados históricos.</i>
(BARRETO; ALEXANDRINO; COELHO, 2016)	<i>Positioning of ambulances of the SAMU system by Integer Programming and Queuing Theory.</i>	Gestão & Produção, 23(4), 828-841	Maximizar a demanda coberta / Avaliar o despacho das ambulâncias e o desempenho do sistema sob congestionamento.	PLI via CPLEX (modelos FLEET e MALP) e Modelo Hipercubo.	09 ambulâncias. 48 nós de demanda. <i>Não informado se teve acesso a dados históricos.</i>
(MARQUES, 2016)	Aplicação de uma Abordagem Robusta no Problema de Localização de Ambulâncias com Estudo de Caso na Cidade de Catalão - Goiás.	Dissertação de Mestrado – Modelagem e Otimização (UFG)	Minimizar o custo relacionado a ambulâncias e bases para atender toda a demanda.	PLI via CPLEX e Gurobi (modelo nominal e modelo robusto).	84 nós de demanda. Coletados os dados do ano de 2015 ( <i>não informada a quantidade</i> ).

Fonte: Autora, 2017

## 2.2 Estudos no Mundo

A literatura sobre o problema de localização de facilidades é vasta. Muito já se estudou sobre o assunto e novas abordagens vão surgindo com a criação de modelos capazes de representar cenários com níveis cada vez mais próximos da realidade. Estudos como os de Church e ReVelle (1974), Gendreau, Laporte e Semet (1997), Schilling et al. (1979), ReVelle e Hogan (1989), ReVelle e Marianov (1991), Marianov e ReVelle (1996) e Mandell (1998) foram referências para o desenvolvimento do modelo utilizado neste trabalho e serão tratados detalhadamente no Capítulo 3. Nesta seção, serão apresentadas algumas das técnicas utilizadas recentemente para a solução de problemas de localização de facilidades em diversos segmentos.

O problema das  $p$ -medianas é um dos mais estudados problemas de localização de facilidades em rede. Dado um conjunto de potenciais locais para instalação de facilidades e um conjunto de pontos de demanda, o problema das  $p$ -medianas procura localizar as facilidades nos melhores locais tal que o custo total de transporte para o atendimento dos clientes, a partir da facilidade mais próxima, seja o menor possível. Hansen e Mladenović (1997) afirmam que para instâncias onde  $n \leq 500$  e  $p \leq 50$  o modelo pode ser resolvido através de um método exato em tempos computacionais aceitáveis. A complexidade aumenta à medida em que os parâmetros crescem, especialmente o número de facilidades. São encontrados estudos solucionados por métodos exatos com  $p \leq 167$  (BEASLEY, 1985). Não foram encontrados estudos mais recentes que resolveram o problema das  $p$ -medianas através de métodos exatos com instâncias maiores que as citadas acima. Em geral, para instâncias maiores, os métodos não exatos, como a utilização de heurísticas, são mais úteis por oferecerem boas soluções com menores custos.

Para o problema de cobertura de conjuntos (*set covering*), em muitos casos é possível chegar à solução ótima via programação linear, com a utilização de plano de cortes, o que não acontece com a versão de máxima cobertura (*maximal covering*). Determinadas regras que podem ser aplicadas ao primeiro caso não são válidas no segundo, o que pode torná-lo mais complexo de ser resolvido. Ainda assim, o uso de programação linear com técnicas de *branch-and-bound*, heurísticas gulosas e de substituição de vértices podem ser aplicados em algumas instâncias com sucesso (REVELLE; EISELT, 2005).

Cappanera, Gallo e Maffioli (2003) utilizaram programação linear via algoritmo *Branch-and-Bound* no problema de localização de facilidades indesejáveis. Curtin, Hayslett-McCall e Qiu (2010) integraram o método de programação linear ao SIG para localizar patrulhas policiais, em um estudo de caso na cidade de Dallas, Texas, EUA. Erdemir et al. (2010) trabalharam a união do transporte terrestre e aéreo para cobertura do atendimento de colisões em uma rodovia do Novo México via heurística gulosa e programação linear. Foram encontrados, na literatura, problemas de máxima cobertura resolvidos pelo método exato com até 900 nós (REVELLE; SCHOLSSBERG; WILLIAMS, 2008).

Nos estudos realizados por [Galvão, Espejo e Boffey \(2000\)](#), uma formulação de PL foi resolvida através do CPLEX em tempo computacional satisfatório para instâncias com até 600 vértices. Apesar dos resultados, devido a alta variabilidade dos tempos do CPLEX entre as instâncias avaliadas, os autores não recomendam sua utilização como técnica padrão para resolver problemas de máxima cobertura, uma vez que os tempos computacionais não são previsíveis e dependem mais dos dados do problema do que do tamanho da instância.

*However, it was found that CPU times depend more on the data of specific problems than on problem size. This fact justifies the development of specialized algorithms for MCLP. Besides becoming prohibitive for the larger problems, low average CPLEX times for some sets of the smaller problems do not mean that these problems may in general be expected to run in predictable computing times when CPLEX is used. (GALVÃO; ESPEJO; BOFFEY, 2000, p. 386).*

Algoritmos Genéticos têm sido cada vez mais utilizados em problemas de localização de facilidades e são considerados interessantes alternativas de busca global para modelos com funções objetivo multimodais ([ZHAN et al., 2003](#)). [Jaramillo, Bhadury e Batta \(2002\)](#) apresentaram um estudo em que se testou a eficácia do método em cinco problemas distintos de localização de facilidades: localização de facilidades com custo fixo, capacitados e não, modelos de máxima cobertura e modelos competitivos medianóide e centróide. Os resultados mostraram que a metaheurística evolui rapidamente para uma boa solução, apesar de gastar muito tempo para melhorar esse resultado, tornando-a inferior em termos de tempo computacional em relação a outras técnicas.

Em problemas de localização de máxima cobertura, versões do Algoritmo Genético (AG) foram aplicadas com sucesso em diversos estudos. [Shariff, Moin e Omar \(2012\)](#) utilizaram a metaheurística em um problema capacitado de alocação de centros de saúde em regiões da Malásia com instâncias de 179 e 809 nós. [McCormack e Coates \(2015\)](#) a implementaram para alocação de bases de serviço médico de emergência em Londres, integrado à simulação. [Jia, Ordóñez e Dessouky \(2007\)](#) abordaram o problema de alocação de suprimentos para emergências médicas de alta demanda, como em casos de ataques terroristas, desastres naturais etc.

[Sasaki et al. \(2010\)](#) usaram algoritmo genético para otimizar a localização de ambulâncias para serviços médicos de emergência na província de Niigata, Japão, considerando o cenários de crescimento demográfico até 2050. Os autores utilizaram dados de ocorrências realizadas durante nove meses, totalizando 21.211 casos. Com 35 pontos candidatos a instalação de facilidades, 27 unidades móveis e 2.076 nós de demanda, os autores conseguiram reduzir os tempos de resposta em até 57 segundos. Em outro contexto, [Pasandideh e Niaki \(2012\)](#) utilizaram um AG para localização de caixas automáticos considerando a demanda randômica e uma estrutura de fila. O uso da metaheurística também aparece

na solução do problema das p-medianas, em que diferentes resultados são encontrados, muitos deles satisfatórios, além da implementação de um algoritmo paralelo (ALP; ERKUT; DREZNER, 2003), (HOSAGE; GOODCHILD, 1986), (PEREZ; GARCIA; MORENO, 1994).

A Busca Tabu foi a técnica mais encontrada na pesquisas realizadas e sua utilização no problema das p-medianas tem sido tratada extensivamente (GLOVER, 1989), (GLOVER, 1990), (HANSEN; JAUMARD, 1990), (VOSS, 1996), (SALHI, 2002), (GONCHAROV; KOCHETOV, 2002 apud MLADENOVIC et al., 2007), (ROLLAND; SCHILLING; CURRENT, 1997). Para o problema de localização de serviços de emergência, destaca-se o trabalho de Gendreau, Laporte e Semet (1997), que utilizaram o modelo *Double Standard Model* (DSM) para alocação de ambulâncias. Uma evolução desse trabalho, que considera também a realocação dinâmica dos veículos, é apresentada pelos mesmos autores (GENDREAU; LAPORTE; SEMET, 2001).

A metaheurística *Simulated Annealing*, técnica de busca local probabilística que utiliza conceitos da termodinâmica e tem, como princípio básico, aceitar soluções de piora para escapar de ótimos locais, foi utilizada em problemas de p-medianas, máxima cobertura, localização dinâmica e também para solução de problemas de atribuição quadráticos (QPA), que trata do posicionamento de componentes eletrônicos em um chip, por exemplo (AL-KHEDHAIRI, 2008), (LEVANOVA; LORESH, 2004), (MURRAY; CHURCH, 1996), (QIN; NI; SHI, 2012), (MCKENDALL; SHANG; KUPPUSAMY, 2006), (MISEVICIUS, 2003).

Arostegui, Kadipasaoglu e Khumawala (2006) compararam as três metaheurísticas mais utilizadas em problemas de localização de facilidades, Busca Tabu, *Simulated Annealing* e Algoritmo Genético em três casos distintos: problemas capacitados (CFLP), multiperíodos (MPFLP) e multiprodutos (MCFLP). Os autores concluíram que a Busca Tabu obteve a melhor performance e sugerem que essa técnica seja utilizada primeiramente, por apresentar resultados robustos e ser de fácil desenvolvimento e implementação.

Hansen e Mladenović (1997) foram os primeiros a utilizar VNS (*Variable Neighborhood Search*) para resolver problemas de p-medianas. Nova na época, a metaheurística foi aplicada em instâncias da literatura com até 3.038 nós e 500 facilidades. Os autores construíram uma solução, primeiramente, através de uma heurística gulosa e com os valores encontrados aplicaram o método de substituição de vértices *Fast Interchange*. A solução encontrada foi utilizada como solução inicial do VNS. Os resultados foram satisfatórios e a técnica conseguiu melhores resultados médios para  $n = 1.400$  e  $n = 3.038$ , quando comparados com dois métodos de Busca Tabu. Schmid e Doerner (2010) utilizaram o VNS para localização e realocação multiperíodo de ambulâncias e, para aumentar a eficiência do modelo ou melhorar a exploração do espaço de soluções, García-López et al. (2002) e Crainic et al. (2004) desenvolveram algoritmos para paralelização em VNS.

Outras metaheurísticas também já foram utilizadas, como *Scatter Search* (CONTRE-RAS; DÍAZ, 2008) e (GARCIA-LÓPEZ et al., 2003), Colônia de Formigas (BAYKASOGLU;

DERELI; SABUNCU, 2006) e (TALBI et al., 2001), Redes Neurais (TSUCHIYA; BHARITKAR; TAKEFUJI, 1996) e Enxame de Partículas, esse último considerado um método de solução eficiente para problemas de programação não linear utilizado em variados cenários de localização de facilidades e alocação de recursos (UNO; KATAGIRI; KATO, 2007), (GONG et al., 2012), (YAPICIOGLU; SMITH; DOZIER, 2007).

O desenvolvimento de modelos híbridos proporciona a junção de técnicas de várias metaheurísticas clássicas que, assim, são capazes de percorrer o espaço de solução de forma mais efetiva. Mladenović, Labbé e Hansen (2003) utilizaram VNS e Busca Tabu, com o método de substituição de vértices em problemas *p-center*.

Klincewicz (1992) desenvolveu um algoritmo baseado em Busca Tabu e GRASP para a solução de problemas *p-hub*. Já Resende e Werneck (2004) desenvolveram um modelo híbrido ao utilizar a metaheurística *Multi-Start* com características presentes da Busca Tabu, *Scatter Search* e Algoritmos Genéticos para problemas de *p*-medianas. No Quadro 2 encontra-se um resumo dos estudos relatados nessa seção.

Quadro 2 – Principais estudos: Mundo

Autor	Problema	Técnica
(BEASLEY, 1985)	P-mediana	PLI
(HOSAGE; GOODCHILD, 1986)	P-mediana	Algoritmo Genético
(GLOVER, 1989)	P-mediana	Busca Tabu
(GLOVER, 1990)	P-mediana	Busca Tabu
(HANSEN; JAUMARD, 1990)	P-mediana	Busca Tabu
(KLINCEWICZ, 1992)	P-hub	Busca Tabu + GRASP
(PEREZ; GARCIA; MORENO, 1994).	P-mediana	Algoritmo Genético
(MURRAY; CHURCH, 1996)	P-mediana Cobertura	Simulated Anneling
(VOSS, 1996)	P-mediana	Busca Tabu
(TSUCHIYA; BHARITKAR; TAKEFUJI, 1996)	FLP	Redes Neurais
(GENDREAU; LAPORTE; SEMET, 1997)	Cobertura	Busca Tabu
(HANSEN; MLADENOVIC, 1997)	P-mediana	VNS
(ROLLAND; SCHILLING; CURRENT, 1997)	P-mediana	Busca Tabu
(GENDREAU; LAPORTE; SEMET, 2001)	Cobertura	Busca Tabu Paralela
(TALBI et al., 2001)	QAP	Colônia de Formigas Paralelo
(GARCÍA-LÓPEZ et al., 2002)	P-mediana	VNS Paralelo
(JARAMILLO; BHADURY; BATA, 2002)	Vários	Algoritmo Genético
(SALHI, 2002)	P-mediana	Busca Tabu
(ALP; ERKUT; DREZNER, 2003)	P-mediana	Algoritmo Genético
(CAPPANERA; GALLO; MAFFIOLI, 2003)	Maxisum	PLI ( <i>Branch-and-Bound</i> )
(GARCIA-LÓPEZ et al., 2003)	P-mediana	<i>Scatter Search</i> Paralelo
(MISEVICIUS, 2003)	QAP <sup>1</sup>	Simulated Anneling
(MLADENOVIC; LABBE; HANSEN, 2003)	P-centro	VNS + Busca Tabu
(CRAINIC et al., 2004)	P-mediana	VNS Paralelo
(LEVANOVA; LORESH, 2004)	P-mediana	Simulated Anneling
(RESENDE; WERNECK, 2004)	P-mediana	<i>Multi-Start</i> , Busca Tabu, Algoritmo Genético, <i>Scatter Search</i>
(BAYKASOGLU; DERELI; SABUNCU, 2006)	DFLP <sup>5</sup>	Colônia de Formigas
(MCKENDALL; SHANG; KUPPUSAMY, 2006)	FLP Dinâmico	Simulated Anneling
(JIA; ORDÓÑEZ; DESSOUKY, 2007)	Cobertura	Algoritmo Genético
(UNO; KATAGIRI; KATO, 2007)	FLP Multi-objetivo	Enxame de partículas
(YAPICIOGLU; SMITH; DOZIER, 2007)	SDFLP <sup>3</sup>	Enxame de partículas
(AL-KHEDHAIRI, 2008)	P-mediana	Simulated Anneling
(CONTRERAS; DÍAZ, 2008)	SSCFLP <sup>4</sup>	<i>Scatter Search</i>
(CURTIN; HAYSLETT-MCCALL; QIU, 2010)	Cobertura	PLI + GIS
(ERDEMIR et al., 2010)	Cobertura	Heurística Gulosa + PLI
(SASAKI et al., 2010)	Cobertura	Algoritmo Genético
(SCHMID; DOERNER, 2010)	Cobertura	VNS
(GONG et al., 2012)	RAP Multi-objetivo <sup>2</sup>	Enxame de partículas
(PASANDIDEH; NIAKI, 2012)	Cobertura	Algoritmo Genético
(QIN; NI; SHI, 2012)	FLP Discreto	Simulated Anneling
(SHARIFF; MOIN; OMAR, 2012)	Cobertura	Algoritmo Genético
(MCCORMACK; COATES, 2015)	Cobertura	Algoritmo Genético

Fonte: Autora, 2017

<sup>1</sup> Quadratic Assignment Problem.<sup>2</sup> Resource Allocation Problem.<sup>3</sup> Semi-Desirable FLP.<sup>4</sup> Single Source Capacitated Facility Location Problem.<sup>5</sup> Dynamic Layout Problem.

## 3 Fundamentação Teórica

Nesta seção, serão apresentados os principais conceitos que deram base a este estudo e os trabalhos que foram utilizados como referência para o seu desenvolvimento. Na [Seção 3.1](#) serão apresentadas as principais abordagens para o problema de localização de facilidades. Extensões dos modelos estão detalhados no [Apêndice A](#). Na [Seção 3.2](#) serão abordados alguns conceitos de Estatística e Probabilidade e na [Seção 3.3](#) serão apresentadas as principais características de problemas multiobjetivo, utilizados no decorrer do trabalho.

### 3.1 O problema de Localização de Facilidades

Grande parte das instituições, públicas ou privadas, passam por situações em que a definição sobre a localização de serviços e espaços físicos podem impactar o desempenho e os resultados do negócio. Para cada setor ou tipo de serviço, o problema de localização possui características próprias e visa objetivos distintos como:

- Em indústrias, a localização de fábricas, centros de distribuição e armazéns visa atender a determinada demanda com o menor custo possível;
- No setor de serviços, a definição de onde instalar lojas físicas e posicionar a mão de obra tem como objetivo cobrir um maior número de clientes;
- No âmbito público, a escolha dos melhores lugares para escolas, postos de saúde, delegacias de polícia e corpo de bombeiros, tem o propósito de oferecer à sociedade um maior acesso a esses serviços.

Um modelo clássico do Problema de Localização de Facilidades (*Facility Location Problem - FLP*) foi apresentado por [Shmoys, Tardos e Aardal \(1997\)](#). Seja um conjunto de localidades  $N = \{1, \dots, n\}$ ; um subconjunto  $F \subseteq N$  de possíveis pontos para instalação das facilidades; e um outro subconjunto  $D \subseteq N$  de locais que devem ser atendidos. Para cada ponto  $i \in F$ , há um custo de instalação  $f_i$  e, para cada local  $j \in D$ , uma demanda  $d_j$ , ambos assumindo valores não negativos. O custo unitário de transporte entre  $i$  e  $j$  é dado pelo parâmetro  $c_{ij} \in \mathbb{R}^+$ , assumindo valores simétricos e que satisfaçam à desigualdade triangular (os custos das arestas atendem à restrição  $c_{ij} \leq c_{ik} + c_{kj}$ ), ou seja,  $c_{ij}$  é o menor custo unitário de transporte entre os pontos  $i$  e  $j$ . Por essas características o modelo é conhecido como *Metric Uncapacitated Facility Location Problem*. O objetivo está em encontrar um caminho viável entre cada demanda e uma facilidade instalada que minimize o custo total do processo, conforme Equação (1), e considera-se que as facilidades não

possuem limite de capacidade.

$$\text{minimizar custo} = \sum_{i \in F} f_i y_i + \sum_{i \in F} \sum_{j \in D} d_j c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

sujeito a:

$$\sum_{i \in F} x_{ij} = 1, \quad \forall j \in D, \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq y_i, \quad \forall i \in F, \quad \forall j \in D, \quad (3)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in F, \quad \forall j \in D, \quad (4)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i \in F. \quad (5)$$

São variáveis do modelo:

- $x_{ij}$ : variável binária que informa se a demanda  $j$  será atendida pela facilidade  $i$ , quando  $x_{ij} = 1$ , ou, caso contrário,  $x_{ij} = 0$ , conforme Equação (4).
- $y_i$ : variável binária que informa se a facilidade  $i$  será instalada, quando  $y_i = 1$ , ou, caso contrário,  $y_i = 0$ , conforme Equação (5).

A restrição (2) garante que cada demanda será atendida por uma única facilidade e na restrição (3) é assegurado que uma demanda só poderá ser atendida por uma facilidade, caso essa esteja instalada.

Existe na literatura um grande número de variações do problema de localização de facilidades. No estudo realizado por [Klose e Drexl \(2005\)](#) são listadas as classificações mais encontradas. Uma das principais se refere à presença ou não de restrições de capacidade, o que impacta diretamente na quantidade de demanda que pode ser atendida por cada instalação. A realidade de cada setor também contribui para a diversidade dos modelos já desenvolvidos:

- No setor privado, em geral, o objetivo de um problema de localização envolve a redução de custos e os benefícios são medidos em unidades monetárias. Por ser uma estratégia que visa a economia financeira, utiliza-se com mais frequência a minimização da distância média percorrida (*minsum*) ([LABBÉ; THISSE; WENDELL, 1991](#)).
- No setor público, em muitos casos, a viabilização do acesso a determinada facilidade é tão importante quanto a redução dos custos financeiros envolvidos. Por isso, minimizar a distância máxima (*minmax*) é uma estratégia mais utilizada ([OGRYCZAK, 1997](#)).

Em alguns tipos de negócio, é necessária a integração do problema de localização com outras tomadas de decisão como, por exemplo, o planejamento de rotas. Além disso, os modelos podem ser determinísticos ou probabilísticos; os parâmetros podem considerar dados estáticos ou dinâmicos; a demanda pode ser elástica, assumindo, assim, o objetivo de maximizar a receita, ou inelástica, minimizando custos, e a distribuição dos produtos pode ocorrer em apenas uma fase (estágio único) ou em várias fases (multiestágio).

Uma das classificações utilizadas quanto ao objetivo do modelo de localização de facilidades é conforme as estratégias *Pull* ou *Push* (EISELT; LAPORTE, 1995). Quando a função objetivo tem característica *Pull* é desejável que as facilidades fiquem próximas da demanda, como em modelos de minimização da distância entre uma planta de produção e o mercado consumidor, em que se pretende minimizar custos de transporte e maximizar a disponibilidade do produto. De forma geral, esses problemas são divididos em: p-mediana (min-sum), com o objetivo é minimizar a distância total; p-centros (min-max), para minimização da distância máxima percorrida; problemas não-capacitados (min-sum); e problemas quadráticos (min-sum), que priorizam a minimização da distância total entre facilidade e demanda naqueles onde há maior fluxo. Alguns trabalhos com estratégias *Pull* foram citados no [Capítulo 2](#).

Já os problemas *Push* tratam de localizar facilidades indesejáveis, por serem desagradáveis ou nocivos como, por exemplo, a localização de uma unidade de tratamento de resíduos. Ou seja, o objetivo é maximizar a distância entre a facilidade e a demanda. Alguns modelos de dispersão mais utilizados são: p-dispersão (max-min-min), em que se maximiza a distância mínima entre dois pontos; p-proteção (max-sum-min), em que se maximiza a distância total mínima entre dois pontos; anti-hub (max-min-sum), que maximiza a distância mínima entre todos os pontos; e maxi-sum dispersão (max-sum-sum), que maximiza a distância total mínima entre todos os pontos (KRARUP; PISINGER; PLASTRIA, 2002). Para problemas multicritério, estuda-se a classificação *Pull/Push*, que trata de objetivos conflitantes como, por exemplo, a instalação de um campo de futebol, onde os investidores desejam que o local seja de fácil acesso ao público mas que possui a resistência dos moradores, que se incomodam em ter uma instalação desse porte próximo da sua residência (FARAHANI; HEKMATFAR, 2009).

Os problemas denominados *Uncapacitated Facility Location Problem - UFLP* são aqueles em que se considera que as facilidades que serão instaladas possuem capacidade infinita para atender a demanda. Na maioria dos casos, o que acontece é que sabe-se antecipadamente que a facilidade irá operar muito abaixo da sua capacidade máxima e, com isso, assume-se que se trata de um modelo incapacitado. Mas em muitas situações reais, as facilidades possuem de fato um limite máximo de demandas que se consegue atender como, por exemplo, a capacidade produtiva de uma planta fabril, a capacidade de concentradores em uma rede de telecomunicações e a capacidade de leitos em um hospital

de uma cidade. Para esses problemas, é imprescindível que a capacidade da facilidade seja considerada como restrição do modelo, e são chamados de *Capacitated Facility Location Problem - CFLP* (MELKOTE; DASKIN, 2001).

Em localização de facilidades, o número de níveis de um problema se refere à quantidade de deslocamentos (arcos) percorridos para que o produto saia da fonte e chegue ao destino final. Quando o problema tem apenas um nível, a decisão está em onde instalar as facilidades e quais clientes serão atendidos por cada uma, uma vez que os produtos escoam diretamente de um para o outro. Um exemplo de problema com dois níveis pode ser visto em fábricas, onde existe uma planta de produção que escoam os produtos para centros de distribuição, responsáveis por armazená-los e, posteriormente, enviar a mercadoria para os consumidores finais. Conforme explicado por Ageev (2002), em um problema de facilidade multinível, existem  $d$  pontos de demanda e  $k$  tipos de facilidades, sendo um considerado a fonte ou ponto extremo e os  $k - 1$  pontos restantes como intermediários. Cada produto sai de uma fonte e precisa passar por uma das facilidades de todos os  $k - 1$  níveis até chegar ao destino final. O objetivo se assemelha com o problema de um nível mas, agora, além das possibilidades dos caminhos aumentarem a cada facilidade instalada, eles também se multiplicam a cada nível existente.

Quando o problema engloba mais de um tipo de produto ofertado pelas facilidades, outras questões precisam ser consideradas. Além da definição do ponto de cada facilidade, é preciso levar em consideração quais produtos serão produzidos em cada uma delas, com o objetivo de minimizar custo de produção, instalação e transporte. Ou seja, onde e quantas plantas serão instaladas e quantas e quais máquinas cada uma terá. Cada produto necessita passar por uma sequência de máquinas diferentes. Cada máquina possui diferentes custos, especificações e capacidades e cada cliente demanda uma quantidade específica de cada produto. Outro ponto: as diferentes plantas podem possuir diferentes áreas e comportar ou não a instalação de determinada máquina (REVELLE; LAPORTE, 1996).

Define-se por demanda elástica aquela em que o preço final do produto interfere diretamente na sua procura, ou seja, nos casos em que a demanda é inelástica, a receita total aumenta proporcionalmente com o preço, uma vez que a demanda não se altera. Entende-se por preço final o custo do cliente para acessar essa facilidade, seja ele financeiro, de tempo ou distância. Na maioria dos problemas de localização de facilidades, a demanda requerida é considerada fixa, independente de onde a facilidade será instalada (e dos custos atribuídos ao produto/serviço com base nessa decisão). Porém, nos casos em que é considerada a elasticidade da demanda, existe um preço que o consumidor está disposto a pagar e, a partir dele, a demanda começa a cair. Inclusive no setor público, em que não há custo financeiro para o consumidor, foi observado que a demanda dos usuários pode ser considerada uma função decrescente à distância da facilidade (WAGNER; FALKSON,

1975). Nesses casos, a função objetivo que, com a inelasticidade, era de minimização de custos, passa a ser o encontro do ponto de equilíbrio que, no setor privado, maximize a receita e, no caso do setor público, maximize o bem estar da população.

Nos problemas de localização de facilidades estáticos (*Static Facility Location Problem - STFLP*), o espaço é o fator mais importante no processo de decisão. Os clientes estão em locais predeterminados e as facilidades serão instaladas em locais a serem especificados com base na função objetivo em questão, que leva em conta um período de tempo específico. Em problemas dinâmicos (*DFLP - Dynamic Facility Location Problem*), o tempo é um fator determinante no processo de decisão e é afetado por dois critérios principais: a decisão entre instalar uma nova facilidade ou revisar a instalação de uma facilidade já existente, avaliando os prós e contras de cada uma, e a interação com o tempo, onde se considera a abertura e/ou fechamento da facilidade em um horizonte de planejamento, ou seja, os parâmetros do modelo sofrem variações com relação ao tempo. Segundo Arabani e Farahani (2012), todos os tipos de problema de localização de facilidades estáticos podem ser transformados em um problema equivalente que seja dinâmico.

Nos problemas considerados determinísticos, o valor de todos os parâmetros (demandas, distâncias e custos) são considerados conhecidos. Apesar de fornecer informações gerais sobre os melhores pontos para a localização das facilidades, o modelo desconsidera as incertezas inerentes do mundo real. Já nos modelos probabilísticos, qualquer parâmetro de entrada do modelo pode ser considerado incerto e a eles são associadas as distribuições de probabilidade. Os impactos no valor da função objetivo resultantes da alteração das quantidades aleatórias modeladas são estudados para que seja criado um modelo robusto, que irá funcionar bem dentro de um intervalo de valores possíveis para os parâmetros, determinados conforme critérios preestabelecidos (OWEN; DASKIN, 1998).

Na revisão da literatura sobre estratégias de localização de facilidades realizada por Owen e Daskin (1998), as classes de problemas determinísticos são destacadas:

- Problema das medianas (*median problems*): busca encontrar a menor distância média percorrida. Neste caso, quanto maior a distância média, menor a acessibilidade à facilidade e, portanto, menos efetiva foi a solução encontrada. No problema das *p*-medianas, as distâncias entre o ponto candidato e a demanda são como pesos que, multiplicados à quantidade demandada, darão à função objetivo uma ordem de prioridade para minimização (quanto maior a demanda, mais próximo de lá uma facilidade tende a ser instalada). É aplicado na definição de pontos de abertura de livrarias, escolas e centros de serviços de emergência, facilidades em que a proximidade é desejada. Outra aplicação encontrada na literatura consiste em instalar facilidades que possam concorrer com as empresas já existente na região e capturar seus clientes, partindo do pressuposto que os consumidores optem pela facilidade mais próxima.

- Problema de cobertura (*covering problems*): cobrir a maior quantidade da demanda até um custo específico. Aplicado em problemas críticos, como localização de serviços de emergência (corpo de bombeiros, ambulâncias etc), a eficiência está em atender dentro de um máximo aceitável, definido como valor crítico, seja de distância e/ou de tempo. É dividido em duas categorias: problemas de cobertura de conjuntos e problemas de máxima cobertura. Na primeira, toda a demanda tem que ser coberta, ou seja, atendida dentro do intervalo estabelecido e deseja-se minimizar o número de facilidades instaladas e, conseqüentemente, o custo dessas instalações. Na segunda, deseja-se que a maior quantidade possível da demanda seja coberta dentro do valor crítico e, assim, otimizar a localização de um número fixo de facilidades. Em alguns casos, pode-se utilizar ambos: definir um valor crítico  $S$  mais rigoroso e maximizar o número de demandas cobertas até esse limite e aos demais, não cobertos, garantir que eles sejam atendidos dentro de um outro valor crítico,  $T$ , sendo  $T > S$ . Outros detalhes sobre essa classe serão detalhados na Seção 3.1.1.
- Problema central (*center problems*): exige a cobertura de todas as demandas com um número fixo de facilidades. A variável de decisão é a distância máxima entre a demanda e a facilidade mais próxima, e a função objetivo consiste em minimizá-la. Ao invés do parâmetro ser um valor limite para a distância, como no problema de cobertura de conjuntos, esse valor será encontrado pelo modelo. Conhecido também como *minimax problem*.

Outras duas classes, mais recentes, são citadas por Arabani e Farahani (2012) para o problema de localização de facilidades em rede:

- Problema de localização de hub (*hub location problem*): modelo de alocação de fluxo, com o objetivo de minimizar o custo total de deslocamentos a partir da escolha dos melhores pontos para localização dos *hubs*, concentradores responsáveis por fazer o transbordo de pessoas, cargas, informações etc entre múltiplas origens e destinos. É muito aplicado a problemas em rede de transportes e telecomunicação (DUBKE; FERREIRA; PIZZOLATO, 2004).
- Problema de localização hierárquica (*hierarchical location problem*): utilizado em problemas com mais de um nível, onde os tipos de facilidades obedecem determinado critério hierárquico. Aquelas que estão em um nível mais alto são localizadas independentemente dos níveis abaixo e todo o custo envolvido nas instalações e transporte é proporcional ao fluxo entre a fonte e o destino, ou seja, se relaciona ao custo da demanda.

A partir do problema geral de localização de facilidades é possível gerar diversas variações conforme características e especificidades do problema, como retratado nessa seção. É importante salientar que, além dessas, outras classificações e vertentes já foram estudadas e tantas outras podem surgir, a partir de novas perspectivas e outras combinações

de variáveis e parâmetros.

### 3.1.1 O problema de cobertura

A essência do problema de cobertura em localização de facilidades está em estabelecer um valor crítico que será a referência para que uma demanda seja considerada coberta ou não. Fallah, NaimiSadigh e Aslanzadeh (2009 apud FARAHANI et al., 2012) o definiram como distância de cobertura ou raio de cobertura.

Farahani et al. (2012) apresentam uma revisão dos estudos realizados entre Janeiro de 1992 e Fevereiro de 2011, além de alguns relevantes em períodos anteriores. Foram selecionados em sua maioria artigos em revistas, conferências e livros relacionados pela plataforma SCOPUS, um total de 1.531 trabalhos.

O problema de cobertura foi introduzido pela primeira vez por Hakimi (1965 apud FARAHANI et al., 2012) com o objetivo de encontrar o número mínimo de policiais necessários para cobrir pontos numa rede de estradas. A formulação foi realizada como um problema de cobertura de vértices em um grafo. Dado um grafo  $G$ , com o mesmo peso em cada uma das ramificações, um conjunto de vértices  $V$  e um subconjunto  $W \subseteq V$ . As distâncias entre nós são definidos por  $d$  e o valor máximo aceitável para uma demanda ser considerada coberta por  $S$ . É possível afirmar que  $W$  cobre  $G$  se  $d(v_i, w) \leq S$ , para todo  $i = 1, \dots, n$ . O parâmetro  $d(v_i, w)$  é o menor valor entre a demanda  $v_i$  e a facilidade  $w$ , entre todos os candidatos.

O primeiro modelo matemático foi proposto por Toregas et al. (1971). Foram tratados como parâmetros:  $m$ , a quantidade dos pontos de demanda,  $n$ , o total de pontos candidatos para instalação da facilidade,  $N_i$ , o conjunto de potenciais locais dentro do valor de cobertura, ou seja  $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$ ,  $d_{ij}$ , a distância entre a demanda  $i$  e a facilidade  $j$  e, por fim,  $S$  como o valor máximo aceitável para cobertura. A variável do modelo,  $x_j$ , é binária e informa se o local  $j$  receberá uma facilidade ( $= 1$ ) ou não ( $= 0$ ). Nesse primeiro momento não foi considerada qualquer restrição relativa à capacidade das facilidades.

$$\text{minimizar } z = \sum_{j=1}^n x_j \quad (6)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (7)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, n \quad (8)$$

O objetivo dado pela Equação (6) é minimizar o número total de facilidades instaladas, sendo que, para cada demanda  $i$ , é necessário pelo menos uma facilidade  $j$  que a cubra,

conforme a restrição (7), e na restrição (8) é apresentado o domínio da variável  $x_j$ .

Francis, McGinnis e White (1992 apud FARAHANI et al., 2012), ao tratarem o problema de cobertura, o separam em duas categorias: problemas cíclicos e problemas em rede acíclicos. Neste último caso, são também chamados de árvores, pois existe um único caminho mínimo entre cada dois nós. Considerando que o grafo é simétrico, composto apenas de valores não negativos e que obedece o conceito de desigualdade triangular e as propriedades de convexidade, ele se torna um problema mais fácil de resolver e pode ser utilizado como uma aproximação de modelos mais complexos ao transformá-los em acíclicos.

A seguir, as duas classes descritas na Seção 3.1, *location set covering problem* e *maximal covering problem* serão detalhadas. Existem na literatura diversas variações de cada uma das abordagens. Essas extensões estão apresentadas no Apêndice A.

### 3.1.1.1 Problema de Cobertura de Conjuntos - *Set Covering Problem (SCP)*

Farahani et al. (2012) apresentam um modelo para o tipo de problema em que a cobertura de toda a demanda é requisito para a solução. São parâmetros: o número de nós de demanda,  $m$ , o número de locais candidatos para instalação das facilidades,  $n$ , o valor limite para cobertura,  $S$ , o custo fixo de instalação da facilidade no local  $j$ ,  $c_j$ , e o parâmetro binário que informa se a distância entre  $i$  e  $j$  atende ao critério  $S$ ,  $a_{ij}$ . A variável de decisão binária  $x_j$  diz se a facilidade será instalada no ponto  $j$  ou não.

$$\text{minimizar } \sum_{j=1}^n c_j x_j \quad (9)$$

sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \geq 1, \quad i = 1, \dots, m \quad (10)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad j = 1, \dots, n \quad (11)$$

Nesses casos, tem-se como objetivo minimizar o custo de instalação das facilidades, apresentado na Equação (9), problema chamado de *Weighted Set Covering Problem - WSCP*, ou minimizar o número de facilidades instaladas, denominado *Minimum Cardinality Set Covering Problem - MCSCP*. As duas alternativas são possíveis pois não são considerados custos unitários de transporte e pode ser usado nos casos em que todos os custos de transporte sejam iguais. Por isso, minimizar o número de facilidades leva a um menor custo e vice-versa. Segundo testes realizados por Vasko e Wilson (1986 apud FARAHANI et al., 2012) o problema MCSCP seria mais difícil de se resolver computacionalmente. A restrição (10) garante que a demanda será atendida por, pelo menos, uma facilidade dentro do limite de cobertura  $S$ , e na restrição (11) define-se o domínio da variável.

### 3.1.1.2 Problema de Máxima Cobertura - Maximal Covering Problem (MCLP)

A cobertura de 100% da demanda torna-se inviável em várias aplicações do mundo real, principalmente devido a restrições orçamentárias. O *MCLP* é uma alternativa para esses casos, em que o objetivo é maximizar a demanda coberta, conforme Equação (12), dentro de um parâmetro (tempo/distância) preestabelecido, com a quantidade de recursos disponíveis.

Conforme modelo apresentado por Church e ReVelle (1974),  $I$  é o conjunto de nós de demanda,  $J$  o conjunto de pontos onde é possível instalar uma facilidade e  $P$  o número de facilidades disponíveis para instalação. A menor distância entre um nó  $i$  e um  $j$  é dada por  $d_{ij}$  e o valor crítico desejado de cobertura por  $S$ , podendo as demandas terem valores críticos distintos  $S_i$ . Ou seja, para distâncias (ou tempos)  $d_{ij}$  abaixo ou iguais a  $S_i$ , a demanda é considerada coberta. Com isso, é possível definir um conjunto  $N_i$  somente com pontos  $j \in J$  que estão dentro do limite de cobertura para cada demanda  $i$ , tal que  $d_{ij} \leq S_i$ . A população que deverá ser coberta pelas facilidades em cada nó de demanda é definida por  $a_i$ . A variável de decisão  $x_j$ , binária, informa se a facilidade será instalada no ponto  $j$  ( $= 1$ ) ou não ( $= 0$ ), e  $y_i$ , também binária, que informa se a demanda  $i$  está coberta ( $= 1$ ) ou não ( $= 0$ ).

$$\text{maximizar } \sum_{i \in I} a_i y_i, \quad (12)$$

sujeito a:

$$y_i \leq \sum_{j \in N_i} x_j, \quad \forall i, \quad (13)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P, \quad (14)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i, \quad (15)$$

$$x_j \in \{0,1\}, \quad \forall j. \quad (16)$$

A restrição (13) garante que cada ponto de demanda  $i$  está coberto se pelo menos uma facilidade entre as que estão aptas a cobri-la for instalada. A restrição (14) limita o número de facilidades que podem ser instaladas. As demais restrições, (15) e (16) definem o domínio das variáveis.

Tanto no modelo SCP quanto o MCLP, quando uma ambulância desloca da sua base para atender um chamado, a região de cobertura atendida por essa facilidade pode ficar descoberta. Em outras palavras, o ponto  $j$  que cobria a demanda  $i$  fica sem ambulância e,

com isso, outras demandas originadas em  $i$  podem não ter uma ambulância que as atenda dentro do tempo crítico  $S_i$ .

Para amenizar essa questão, sem a utilização de parâmetros probabilísticos, [Gendreau, Laporte e Semet \(1997\)](#) desenvolveram um modelo que considera uma dupla cobertura dos nós de demanda denominado DSM (*Double Standard Model*). Neste modelo, são estabelecidos dois valores críticos,  $S_1$  e  $S_2$ , sendo  $S_2 \geq S_1$ . Toda a demanda deve ser coberta por uma ambulância até o valor crítico  $S_2$  e uma porção  $\alpha$  da demanda deve ter sua cobertura dentro do limite  $S_1$ , sendo essa feita pela mesma ambulância anterior ou não. A variável de decisão  $y_i$  ganha mais um índice,  $k$ , referente ao número mínimo de ambulâncias que conseguem cobrir o nó  $i$  dentro de  $S_1$  ( $y_i^k$ ). Duas matrizes binárias informam os pontos  $j$  candidatos a cobrir a demanda  $i$  dentro dos limites de cobertura  $S_1$  e  $S_2$  ( $= 1$  ou  $= 0$ , caso contrário):  $\gamma_{ij}$  e  $\delta_{ij}$ , respectivamente. Além disso, a variável de decisão  $x_j$ , que no modelo anterior era binária agora é inteira e informa a quantidade de ambulâncias alocadas no ponto  $j$ , que possui capacidade  $P_j$ . Os parâmetros  $P$  e  $a_i$ , apresentados no modelo anterior, referem-se ao número de ambulâncias disponíveis para instalação e à população representada por cada nó  $i$ . Para fácil comparação, será utilizada a mesma nomenclatura de variáveis e parâmetros para todos os modelos de máxima cobertura que forem apresentados a seguir.

$$\text{maximizar } \sum_{i \in I} a_i y_i^2 \quad (17)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J} \delta_{ij} x_j \geq 1, \quad \forall i \in I, \quad (18)$$

$$\sum_{i \in I} a_i y_i^1 \geq \alpha \sum_{i \in I} a_i, \quad (19)$$

$$\sum_{j \in J} \gamma_{ij} x_j \geq y_i^1 + y_i^2, \quad \forall i \in I, \quad (20)$$

$$y_i^2 \leq y_i^1, \quad \forall i \in I, \quad (21)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P, \quad (22)$$

$$x_j \leq P_j, \quad \forall j \in J, \quad (23)$$

$$y_i^1, y_i^2 \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \quad (24)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}, \quad \forall j \in J. \quad (25)$$

A função objetivo (17) maximiza a dupla cobertura das demandas dentro do limite preestabelecido  $S_1$ . Na restrição (18) é garantido que haverá pelo menos um ponto  $j$  capaz de cobrir cada demanda  $i$  dentro de  $S_2$  e na restrição (19) define-se um percentual mínimo  $\alpha$  da demanda que será coberta pelo menos uma vez dentro de  $S_1$ . Para cada nível  $k$  de cobertura dentro de  $S_1$  a restrição (20) assegura a instalação das ambulâncias necessárias. Se uma demanda é coberta por pelo menos duas ambulâncias, consequentemente ela estará sendo coberta por pelo menos uma, condição garantida na restrição (21). O número total de ambulâncias instaladas corresponde ao número disponível (restrição (22)), e o número de ambulâncias instaladas em  $j$  não pode ultrapassar a capacidade daquele local (restrição (23)). Nas restrições (24) e (25) são definidos os domínios das variáveis.

Nos modelos de máxima cobertura descritos anteriormente, encontram-se condições genéricas para o problema de localização de facilidades: tipo único de facilidade, a locação dos pontos e alocação das facilidades são tratados como uma única variável, e todos os parâmetros são determinísticos. Dentro do problema de localização de facilidades para serviços de emergência, destaca-se o trabalho de Schilling et al. (1979 apud FIGUEIREDO; LORENA; CARVALHO, 2004) ao apresentar o modelo TEAM (*Tandem Equipment Allocation Model*), que considera dois tipos de facilidades,  $A$  e  $B$  com padrões de cobertura  $N_i^A$  e  $N_i^B$ , diferentes, conforme os valores críticos  $S^A$  e  $S^B$  estabelecidos, e quantidades  $P^A$  e  $P^B$  também distintas. Dessa forma, se aproxima do cenário encontrado nos SAMUs, onde existem as Unidades de Suporte Avançado e Básico e deseja-se encontrar os melhores pontos  $x_j^A$  e  $x_j^B$  para localização de ambas. O parâmetro  $a_i$ , já definido nos modelos anteriores, representa a população presente no nó  $i$ , e a variável  $y_i$ , binária, informa se a demanda  $i$  está coberta (= 1) ou não (= 0).

$$\text{maximizar } \sum_{i \in I} a_i y_i, \quad (26)$$

sujeito a:

$$y_i \leq \sum_{j \in N_i^A} x_j^A, \quad \forall i \in I, \quad (27)$$

$$y_i \leq \sum_{j \in N_i^B} x_j^B, \quad \forall i \in I, \quad (28)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^A = P^A, \quad (29)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^B = P^B, \quad (30)$$

$$x_j^A \leq x_j^B, \quad \forall j \in J, \quad (31)$$

$$y_i \in \{0,1\}, \quad \forall i, \quad (32)$$

$$x_j^A, x_j^B \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J. \quad (33)$$

A função objetivo (26) maximiza a demanda coberta pelos dois tipos de facilidade. A demanda só é considerada coberta se estiver coberta pelos dois tipos de veículos, conforme as restrições (27) e (28), juntas, garantem. A restrição de capacidade de veículos disponíveis de cada tipo é modelada pelas Equações (29) e (30). No modelo TEAM, há uma hierarquia para instalação das ambulâncias, ou seja, a ambulância avançada só pode ser alocada em um ponto caso naquele mesmo ponto tenha sido alocada uma unidade básica, conforme restrição (31). Nas restrições (32) e (33) são definidos os domínios das variáveis.

Uma outra evolução do modelo de máxima cobertura é o modelo FLEET (*Facility Location and Equipment Emplacement Technique*), onde não existe hierarquia entre os tipos de veículos, ou seja, eles podem ser alocados de forma independente e a restrição apresentada em (31) deixa de existir. Além disso, além da variável que informa os pontos onde as ambulâncias serão alocadas,  $x_j^A$  e  $x_j^B$ , já presentes nos modelos anteriores, foi criada uma variável  $z_j$ , binária, que indica se uma base será ativada em  $j$ , ( $= 1$ ), ou não ( $= 0$ ), também com um número limitado de instalações  $P^Z$ . Portanto, há uma divisão entre a escolha dos pontos de localização das bases e a alocação das ambulâncias (SCHILLING et al., 1979 apud BARRETO; ALEXANDRINO; COELHO, 2016). Essa nova configuração é essencial para o posterior desenvolvimento de modelos dinâmicos. O conjunto de nós que podem receber uma instalação é dada por  $J_N \in J$ . Os parâmetros  $a_i$ ,  $P^A$  e  $P^B$  já definidos no modelo anterior, representam a população presente no nó  $i$  e a quantidade de ambulâncias do tipo A e do tipo B disponíveis para alocação, respectivamente. A variável  $y_i$ , binária, informa se a demanda  $i$  está coberta ( $= 1$ ) ou não ( $= 0$ ).

A função objetivo (26), as restrições (27), (28), (29), (30) e os domínios das variáveis  $x_j^A$ ,  $x_j^B$  e  $y_i$  definidos em (32) e em (33) compõem o modelo FLEET. As restrições que asseguram as evoluções do modelo são apresentadas abaixo.

$$\sum_{j \in J_N} z_j = P^Z, \quad (34)$$

$$x_j^A \leq z_j, \quad \forall j \in J_N. \quad (35)$$

$$x_j^B \leq z_j, \quad \forall j \in J_N. \quad (36)$$

$$z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J_N, \quad (37)$$

A quantidade de bases que podem ser instaladas está definida na restrição (34) sendo que uma ambulância, de qualquer tipo, só poderá ser alocada no ponto  $j$  caso haja uma base localizada nesse mesmo ponto, restrição garantida pelas Inequações (35) e (36). O domínio da nova variável  $z_j$ , é definido em (37).

## 3.2 Conceitos de Probabilidade

A probabilidade é um ramo da matemática que estuda a aleatoriedade e a incerteza de uma situação. Sua origem se deu nos estudos envolvendo jogos de azar, há mais de 300 anos, e hoje a teoria da probabilidade, como ciência, é aplicada em contextos diversos. Através dela, é possível quantificar as chances de um evento vir a ocorrer, dentro de todos aqueles possíveis (DEVORE, 2011).

No campo da Probabilidade, entende-se por experimento qualquer processo em que se tenha variabilidade de ocorrência, ou seja, de uma mesma ação pode-se obter diferentes resultados. Para que seja possível quantificar determinada característica do experimento, atribui-se, a cada resultado, um valor real denominado variável aleatória (v.a.). “Variável porque é possível obter diferentes valores numéricos, e aleatória porque o valor observado depende de qual dos resultados possíveis do experimento é obtido” (DEVORE, 2011).

Se a variável aleatória pode assumir valores finitos, ou infinitos contáveis, ela é uma variável aleatória discreta. Caso assuma valores dentro de uma faixa de números reais, é uma variável aleatória contínua. É possível estimar a probabilidade de acontecer cada um desses resultados possíveis, algumas vezes podendo ser expressa em termos de uma fórmula, e a esse cálculo dá-se o nome de distribuição de probabilidade (MONTGOMERY; RUNGER, 2009), ou função de densidade de probabilidade. Considerando  $X$  uma variável aleatória discreta e  $x$  um valor específico atribuído a essa variável, tem-se a seguinte definição:

*Função de probabilidade* é a função que associa a cada valor assumido pela variável aleatória a probabilidade do evento correspondente, isto é:  $P(X = x_i) = P(A_i), i = 1, 2, \dots, n$ . Ao conjunto  $x_i, p(x_i), i = 1, \dots, n$  damos o nome de *distribuição de probabilidades* da variável aleatória  $X$  (...) (MORETTIN, 2010, p. 46-47).

Ao realizar o somatório das probabilidades até determinado valor  $x$ , onde  $P(X \leq x)$ , é obtida a *função de distribuição acumulada*. Dentre as distribuições de probabilidades discretas mais utilizadas, destacam-se a Distribuição de Bernoulli, a Distribuição geométrica, a Distribuição de Pascal, a Distribuição hipergeométrica, a Distribuição binomial, a

Distribuição polinomial ou multinomial e a Distribuição de *Poisson*. Os chamados destinados ao atendimento pré-hospitalar do SAMU-BH atendem às características pertencentes à distribuição de Poisson, conforme será detalhado na Seção 3.2.1.

### 3.2.1 Distribuição de *Poisson*

A Distribuição de *Poisson* não possui um experimento simples que sirva de base para a sua representação. No entanto, uma das suas aplicações mais importantes está no cálculo de probabilidades de ocorrer eventos de um tipo específico no decorrer do tempo. Considerando  $P_k(t)$  a probabilidade de ocorrerem  $k$  eventos (pulsos) no intervalo de tempo  $t$  e  $\alpha$  a taxa do processo:

$P_k(t) = e^{-\alpha t} (\alpha t)^k / k!$ , de forma que o número de pulsos durante um intervalo de tempo  $t$  é uma va de Poisson com parâmetro  $\lambda = \alpha t$ . O número esperado de pulsos durante qualquer um de tais intervalos de tempo serão então  $\alpha t$ , de forma que o número esperado durante uma unidade de tempo será  $\alpha$  (DEVORE, 2011, p. 120).

A equação geral da distribuição de *Poisson* é apresentada na Equação (38).

$$p(x; \lambda) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^x}{x!} \quad (38)$$

Para que um processo possa ser interpretado através da Distribuição de *Poisson*, algumas hipóteses precisam ser atendidas, no que diz respeito ao tamanho do intervalo, à impossibilidade de eventos simultâneos e à sua independência.

Dado um intervalo de números reais, suponha que eventos ocorram ao acaso através de todo o intervalo. Se o intervalo puder ser dividido em subintervalos com comprimentos suficientemente pequenos tal que (1) a probabilidade de mais de um evento em um subintervalo é zero, (2) a probabilidade de um evento em um subintervalo é a mesma para todos os subintervalos e proporcional ao comprimento do subintervalo, e (3) o evento em cada subintervalo é independente de outros subintervalos, o experimento aleatório é chamado de processo de Poisson (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

O conceito de intervalo descrito acima como em função do tempo pode ser ampliado e utilizado em casos de comprimento, de tamanho de uma área ou um volume. Portanto, pode ser denominado processo de *Poisson* qualquer evento que ocorra durante um intervalo fixo, seja um evento ao longo do tempo ou uma ocorrência em uma região bi ou tridimensional.

*Poisson points are realistic models for a large class of points processes: photon count, electron emission, telephone calls, data communication, visits to a doctor, arrivals at a park. The reason is that in these and other applications,*

*the properties of the underlying points can be derived from certain general conditions that lead to Poisson distributions (...) (PAPOULIS, 1991).*

Ao adaptar os conceitos descritos em Devore (2011) para o caso de chamadas de emergência, considera-se uma região e o número de chamados originados de lá. Cada chamado representa um evento que ocorre em um ponto certo no espaço. Portanto, o número de chamados que ocorrem em uma região  $R$  tem distribuição de *Poisson* com parâmetro  $\alpha \cdot a(R)$ , sendo  $a(R)$  a área da região  $R$  e  $\alpha$  o número esperado de chamadas por unidade de área.

### 3.3 Otimização multiobjetivo

Define-se por problema de otimização multiobjetivo aquele com dois ou mais objetivos que são conflitantes. Neste caso, deseja-se otimizá-los simultaneamente e isso não seria possível aplicando uma otimização mono-objetivo.

Em otimização multiobjetivo, são considerados dois espaços. Um deles, o espaço das variáveis, é feita a busca pelas soluções do problema. No outro, chamado de espaço dos objetivos, encontram-se os resultados das funções objetivo. Como foi destacado por Lobato (2008), "manter a diversidade faz com que o problema se torne mais complicado, dado que a proximidade de duas soluções no espaço de variáveis não implica, necessariamente, em proximidade no espaço dos objetivos".

A formulação abaixo descreve um problema multiobjetivo (JÚNIOR, 2011):

$$\text{minimizar } z = f(x) = (f_1(x), f_1(x), \dots, f_{OB}(x)) \quad (39)$$

sujeito a:

$$g(x) = (g_1(x), g_2(x), g_3(x), \dots, g_r(x)) \leq 0 \quad (40)$$

$$h(x) = (h_1(x), h_2(x), h_3(x), \dots, h_r(x)) = 0 \quad (41)$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in X \quad (42)$$

$$z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_r) \in Z \quad (43)$$

Em que:

- $x$  é o vetor de decisão;
- $OB$  é o número de objetivos;

- $z$  é o vetor de objetivos;
- $X$  é o espaço das soluções;
- $Z$  é o espaço objetivo.

Nestes problemas, não é encontrada uma solução única, como acontece nos mono-objetivos, e sim um conjunto de soluções de compromisso. Esse conjunto é chamado de conjunto de Pareto. Entre duas soluções encontradas é possível estabelecer uma relação de dominância ou não dominância. Para um problema de minimização, dado dois pontos,  $\vec{w}$  e  $\vec{y}$ ,  $\vec{w}$  domina  $\vec{y}$  se:

- $f_i(\vec{w}) \leq f_i(\vec{y})$  para todo  $i = 1, \dots, OB$ ;
- $f_j(\vec{w}) < f_j(\vec{y})$  para algum  $j = 1, \dots, OB$ ;
- $\vec{f}(\vec{w}) \neq \vec{f}(\vec{y})$  pois existe um  $i = 1, \dots, OB$  tal que  $f_i(\vec{w}) \neq f_i(\vec{y})$ .

Dessa forma, verifica-se que  $\vec{w} \prec \vec{y}$  se  $\vec{w}$  não é pior em nenhum objetivo e é estritamente melhor em pelo menos um deles, quando comparado a  $\vec{y}$ . A [Figura 4](#) ilustra a relação de dominância entre duas soluções para um problema de minimização bi-objetivo.

Uma solução é considerada ótima quando não é dominada por nenhuma outra. É comum que se encontre mais de uma solução ótima para o mesmo problema e, nesses casos, ao avaliar as funções que a compõem, não é possível definir que uma é melhor que a outra. Se a solução  $x_1 \in X$  domina o solução  $x_2 \in X$ , equivalentemente, diz-se que  $f(x_1) \in Z$  domina  $f(x_2) \in Z$  nas mesmas condições ([TAKAHASHI, 2007](#)).

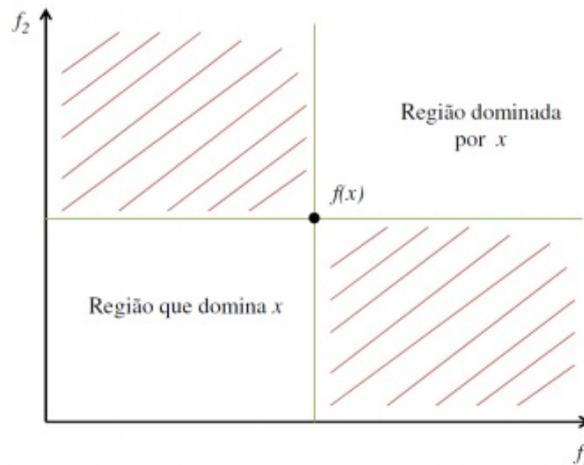
Uma solução é chamada de Pareto-ótima se ela não é dominada por nenhuma outra solução. Ou seja, não existe uma outra solução que melhore um objetivo sem prejudicar pelo menos um dos outros. É também chamada de solução eficiente.

...na solução de problemas multiobjetivos, dois problemas podem ser identificados: busca de soluções e tomada de decisões. O primeiro refere-se ao processo de otimização (...) guiado para o encontro do conjunto de soluções Pareto-Ótimas. O segundo problema (...) consiste na seleção de um critério apropriado para a escolha de uma solução do conjunto Pareto-Ótimo. Este critério será utilizado pelo responsável (...) ele poderá ponderar entre as diferentes soluções conflitantes. ([JÚNIOR, 2011](#), p. 14)

Alguns métodos clássicos para a solução de problemas multiobjetivos associam prioridades ou pesos aos objetivos. A geração dos pontos que pertencem ao conjunto Pareto-Ótimo através da escalarização reduz o problema à condição mono-objetiva ([TAKAHASHI, 2007](#)). São eles:

- método dos pesos: são atribuídos pesos a cada objetivo da Função Objetivo, escolhidos conforme critérios de relevância da função;
- método por metas: utilizado principalmente em casos práticos, em que se tem metas estabelecidas, o método leva em consideração não só a minimização ou maximização da função objetivo como também a minimização dos desvios no alcance das metas;

Figura 4 – Representação do conceito de dominância no espaço dos objetivos em um problema de minimização



Fonte: Pérez (2012)

- método  $\epsilon$ -restrito: um único objetivo é escolhido para compor a Função Objetivo e os demais são tratados como restrições de desigualdade.

Este estudo utilizará o método dos pesos, conhecido como Soma Ponderada, em uma abordagem multiobjetivo do problema de máxima cobertura.

### 3.3.1 Método da Soma Ponderada ( $P_\lambda$ )

Neste método, a função objetivo é determinada pela soma ponderada dos objetivos, conforme Equação (44). Se um mecanismo de otimização consegue resolver cada um dos objetivos isoladamente (abordagens mono-objetivas), ele conseguirá resolver a formulação multiobjetivo, uma vez que o nível de complexidade do modelo original é preservada no modelo modificado. As restrições continuam as mesmas bem como as propriedades da Função Objetivo. Cada peso  $\lambda_p$ , que possui valores entre zero e um, é atribuído a um objetivo  $p$  e o somatório de todos os pesos é igual a um.

$$\text{Max } \lambda_1 f_1(x) + \lambda_2 f_2(x) + \dots + \lambda_p f_p(x) \quad (44)$$

$$x \in X \quad (45)$$

$$\lambda \in \Lambda \quad (46)$$

Em que  $\Lambda = \{\lambda : \lambda \in \mathbb{R}^p, \sum_{k=1}^p \lambda_k = 1, \lambda_k > 0\}$

A definição dos pesos que serão atribuídos a cada função deve seguir um critério coerente com as prioridades e metas dos gestores envolvidos. Como os objetivos estão normalizados, as funções com pesos maiores serão priorizadas no processo de otimização. Nos casos em que a tomada de decisão será realizada após a obtenção dos resultados (*a posteriori*), é necessário um número maior de iterações para que seja possível testar diferentes combinações de escalonamento e, assim, mapear melhor o espaço de soluções. Conforme explica [Takahashi \(2007\)](#), “se se adotar a desigualdade estrita  $\lambda_i > 0$  para  $i = 1, \dots, m$ , tem-se ainda a garantia de que toda solução gerada será pertencente ao conjunto de soluções eficientes.”

Quanto maior o número de objetivos, menos simples pode se tornar a tarefa de ponderação. Diferenças pequenas de pesos entre iterações podem ocasionar saltos grandes nos valores das funções e, por isso, distribuir os pesos uniformemente pode não ser a solução mais adequada. Da mesma forma, conjuntos de pesos diferentes podem levar a uma mesma solução. Assim, uma pequena variação na ponderação irá gerar um número grande de execuções e um único ponto como resultado. Nesse último caso, para esses intervalos de variação de pesos com soluções iguais é dado o nome de região de indiferença ([KORNBLUTH, 1974](#) apud [LOBIANCO; ANGULO-MEZA, 2007](#)).

A aplicação do  $P_\lambda$  garante o encontro de quaisquer soluções localizadas na fronteira. Caso o problema seja convexo, é possível gerar todo o conjunto de soluções eficientes do modelo. Para problemas não convexos, o método é limitado pois não é capaz de mapear os pontos interiores e irá gerar parte do conjunto Pareto-Ótimo. ([TAKAHASHI, 2007](#)).

## 4 Metodologia

Esta pesquisa possui natureza aplicada com objetivos exploratórios, pois se propõe a gerar conhecimento para aplicação prática e, através do aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições, solucionar problemas específicos, conforme explanado por [Silva e Menezes \(2001\)](#) e [Gil \(2002\)](#).

Como o trabalho foi desenvolvido com o foco no Serviço de Atendimento Móvel de Urgência de Belo Horizonte, SAMU-BH, a modalidade de pesquisa adotada foi o estudo de caso. Ele “consiste no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que permita seu amplo e detalhado conhecimento” ([GIL, 2002](#), p. 54). A partir de uma abordagem quantitativa, foi possível uma modelagem mais próxima do real. As etapas da elaboração desta dissertação estão descritas abaixo e seguem as três fases destacadas por [Silva e Menezes \(2001\)](#):

1. fase decisória: em que foram escolhidos o tema e o problema de pesquisa foi delimitado.
2. fase construtiva: coleta de dados, tratamento estatístico, desenvolvimento do modelo matemático, seleção das técnicas de solução do problema e sua execução.
3. fase redacional: organização e sistematização dos resultados obtidos na fase anterior, análise das soluções, conclusão e observações finais.

### 4.1 Delineamento da pesquisa

A primeira fase foi desenvolvida através de procedimento documental e bibliográfico. Na etapa documental, foram realizadas consultas a reportagens e relatórios que tratavam sobre a importância da aplicação da Pesquisa Operacional na área da saúde. Através delas, foram identificados os principais problemas que já vem sendo estudados e definidas as principais questões que seriam abordadas neste trabalho, a partir da sua importância para o meio acadêmico e para a instituição alvo do estudo de caso, descritos no [Capítulo 1](#).

Na etapa bibliográfica, através de livros, periódicos e artigos foram conhecidos os principais estudos já realizados sobre o tema. As abordagens e resultados encontrados apontaram os possíveis caminhos que a pesquisa poderia percorrer através de uma abordagem ao problema de localização de facilidades. Além disso, esses trabalhos indicaram onde o estudo poderia chegar, com as técnicas disponíveis para modelagem do problema de máxima cobertura aos chamados do SAMU-BH, assuntos tratados no [Capítulo 2](#) e no [Capítulo 3](#).

Na segunda fase, foi realizada uma visita técnica à Central de Regulamentação

do SAMU-BH e entrevistas com representantes do órgão para conhecimento de todo o processo e coleta de informações sobre o serviço, sua estrutura, gargalos existentes e principais necessidades. Para acesso aos dados históricos, foi realizada a coleta manual de dados dos prontuários de atendimento do SAMU-BH referentes às ocorrências em que houve empenho de ambulância avançada e/ou básica, no período de Maio de 2016 a Abril de 2017, conforme amostra que se segue:

- amostra A: ocorrências em que houve empenho de USAs. Coletados 100% dos chamados durante 12 meses, totalizando 12.777 ocorrências.
- amostra B: ocorrências em que houve empenho de USBs. Considerando as limitações de tempo para a coleta de 100% dos dados, foi definida uma amostra composta pelas ocorrências originadas em 1/3 dos dias úteis, durante 12 meses, totalizando 16.271 registros.

As seguintes informações foram coletadas: número do chamado, bairro e cidade da ocorrência, horário de empenho da ambulância, horário de chegada/saída da ambulância do local de ocorrência, destino e horário de chegada da ambulância para atendimento hospitalar, horário de liberação da unidade.

Com os registros, feitos em LibreOffice Calc versão: 5.2.7.2, foi possível analisar estatisticamente o comportamento histórico dos chamados e gerar instâncias de testes. Foram consideradas as distribuições de probabilidade históricas de cada chamado conforme os dados abaixo:

1. o dia da semana;
2. a faixa de horário de acordo com o dia da semana;
3. o tipo da ocorrência;
4. o tipo da ambulância apta a atender determinado tipo de ocorrência;
5. a região do chamado;

A partir das etapas descritas e com os dados levantados, foi desenvolvido um modelo de programação linear inteira considerando o número de bases e ambulâncias disponíveis e a simulação de diferentes cenários com a aquisição de novas unidades para os próximos três anos. A solução ótima foi utilizada para cálculo da cobertura das instâncias geradas.

O resultado foi comparado com a cobertura conforme configuração vigente e, assim, definida uma sugestão de localização de bases e alocação de USAs e USBs. As análises e conclusões foram documentadas neste trabalho, conforme descrito na fase 03.

## 4.2 Fração de ocupação das unidades móveis

Para a estimativa da taxa de indisponibilidade das ambulâncias, necessária na [Seção 6.3](#), foi utilizada a [Equação \(47\)](#), descrita por [ReVelle e Hogan \(1989 apud FARAHANI](#)

et al., 2012) e apresentada abaixo. Através dela é possível definir a fração de ocupação  $q$  das unidades avançadas e básicas e assim, estimar a quantidade de ambulâncias necessárias para que uma demanda seja coberta considerando uma probabilidade  $\alpha$  de disponibilidade da facilidade. Mais informações sobre modelos probabilísticos de localização de facilidades podem ser encontradas no [Apêndice A](#).

A duração média de atendimento das ocorrências é dada por  $\bar{t}$ . A quantidade de chamados por nó de demanda é representada por  $a_i$ . A variável binária  $x_j$  informa se existe um ambulância alocada no nó  $j$ . A soma de todas as ambulâncias alocadas representa a quantidade total de unidades e é dada por  $P$ .

$$q = \frac{\bar{t} \sum_{i \in I} a_i}{24 \sum_{j \in J} x_j} = \frac{\bar{t} \sum_{i \in I} a_i}{24P} \quad (47)$$

Os valores que compõem o numerador referem-se ao tempo total de atendimento diário. Para este estudo de caso, eles foram extraídos dos dados coletados nos prontuários, através da diferença entre o horário de liberação e o horário de empenho da unidade. Por exemplo: se uma ambulância foi empenhada às 7:05:00 e liberada às 08:00:00 o tempo total de atendimento do chamado foi de 55 minutos.

Em 63% dos prontuários com empenho de USAs e em 62% dos que tiveram empenhos de USBs esses dados foram preenchidos corretamente e foi possível utilizá-los para estimar o tempo total de atendimento mensal.

Os valores que compõem o denominador se referem ao somatório do tempo total disponível (TTD), considerando o total de ambulâncias disponíveis de cada tipo ( $P^u$ ), conforme [Equação \(48\)](#). O número de dias foi calculado com base nos registros coletados.

$$TTD = 24 \times dias \times P^u \quad (48)$$

No caso das USAs, em que foram coletados os dados de todos os prontuários, foram considerados todos os dias de cada mês. No caso das USBs, se a amostra coletada de determinado mês totalizou oito dias, a equação utilizará esse mesmo valor. Por exemplo:  $24(horas) \times 8(dias) \times 21(USBs) = 4.032$  horas. Os tempos totais médios de atendimento e a fração de ocupação  $q$  calculada são apresentadas na [Tabela 1](#), para as USAs, e na [Tabela 2](#), para as USBs.

A partir das taxas de ocupação encontradas para as unidades avançadas e básicas, de 0,15 e 0,24 nessa ordem, foi possível calcular o número mínimo de ambulâncias necessárias,  $b$ , para que um nó  $I$  seja considerado coberto, dentro de um nível de confiança  $\theta$ . Esse resultado é dado pelo menor inteiro que satisfaça a [Equação \(49\)](#), também descrita por [ReVelle e Hogan \(1989 apud FARAHANI et al., 2012\)](#) e apresentada a seguir. Os

Tabela 1 – Taxa de Ocupação - USAs

Mês de Referência	USA - Tempos totais (em horas)		Fração
	Em Atendimento	Disponível	$q_1$
Maio-2016	763,15	4464	0,17
Junho-2016	806,42	4320	0,19
Julho-2016	699,27	4464	0,16
Agosto-2016	651,72	4464	0,15
Setembro-2016	617,52	4320	0,14
Outubro-2016	600,33	4464	0,13
Novembro-2016	592,82	4320	0,14
Dezembro-2016	691,82	4464	0,15
Janeiro-2017	634,63	4464	0,14
Fevereiro-2017	534,12	4032	0,13
Março-2017	636,02	4464	0,14
Abril-2017	618,80	4320	0,14
Totais e média de $q_1$	7846,60	52560	0,15

Fonte: Autora, 2018

Tabela 2 – Taxa de Ocupação - USBs

Mês de Referência	USB - Tempos totais (em horas)		Fração
	Em Atendimento	Disponível	$q_1$
Maio-2016	960,07	4032	0,24
Junho-2016	857,08	3528	0,24
Julho-2016	885,75	3528	0,25
Agosto-2016	948,15	4032	0,24
Setembro-2016	942,57	3528	0,27
Outubro-2016	856,07	3528	0,24
Novembro-2016	733,77	3528	0,21
Dezembro-2016	903,07	4032	0,22
Janeiro-2017	832,18	3528	0,24
Fevereiro-2017	816,40	3528	0,23
Março-2017	928,68	3528	0,26
Abril-2017	912,03	4032	0,23
Totais e média de $q_2$	10575,82	44352	0,24

Fonte: Autora, 2018

cálculos foram realizados com quatro níveis de confiança distintos, 0,95, 0,90, 0,85 e 0,80 e os resultados para  $b_1$  e  $b_2$  são apresentados na [Tabela 3](#).

$$b = \frac{\log(1 - \theta)}{\log(q)} \quad (49)$$

Tabela 3 – Mínimo de USAs e USBs para cobertura de um nó

$\theta$	$\log(1 - \theta)$	USA			USB		
		$\log(q_1)$	$\frac{\log(1-\theta)}{\log(q_1)}$	$b_1$	$\log(q_2)$	$\frac{\log(1-\theta)}{\log(q_2)}$	$b_2$
<b>0,95</b>	-1,30	-0,82	1,58	<b>2</b>	-0,62	2,10	<b>3</b>
<b>0,90</b>	-1,00	-0,82	1,21	<b>2</b>	-0,62	1,61	<b>2</b>
<b>0,85</b>	-0,82	-0,82	1,00	<b>1</b>	-0,62	1,33	<b>2</b>
<b>0,80</b>	-0,70	-0,82	0,85	<b>1</b>	-0,62	1,13	<b>2</b>

Fonte: Autora, 2018

### 4.3 Geração de Instâncias

Os dados históricos coletados foram utilizados para a criação de instâncias que possuísem características semelhantes às ocorrências reais do SAMU-BH. O total dos chamados gerados em cada instância é apresentado no [Quadro 3](#).

Quadro 3 – Total de chamados por instância gerada

Instância nº	Chamados gerados
1	28908
2	28575
3	28775
4	28959
5	28943
6	28743
7	28750
8	28413
9	28854
10	28916

Fonte: Autora, 2017

Para a definição do número de chamados que deveriam ser gerados por dia foi utilizada a Distribuição de Poisson, conforme a média de chamados diários e equação descrita na [Subseção 3.2.1](#). Foram gerados chamados para o período de um ano (de 01/01/2017 a 31/12/2017).

O pseudocódigo do algoritmo é apresentado no [Algoritmo 1](#). Foram construídas dez instâncias que serão utilizadas para estimar a cobertura conforme a solução exata encontrada. Os dados de cada chamado  $w$  gerado por dia foram definidos conforme distribuição de probabilidade histórica:

- ID: identificação de cada chamado seguindo uma numeração ordinal. O primeiro chamado gerado recebe  $ID = 1$ , o segundo recebe  $ID = 2$  e, assim, sucessivamente.
- Data: seguindo o calendário gregoriano, com início em 1º de Janeiro e término em 31 de Dezembro.

**Algoritmo 1:** Algoritmo para geração de instâncias**Input:** data inicial, média de chamados por mês e dia de semana**Output:** instância com os chamados gerados por 12 meses*CriaBD**DtInicial*  $\leftarrow$  01/01/2017**while** *DtInicial* < 01/01/2018 **do**    *M*  $\leftarrow$  *MediaChamados*    *L*  $\leftarrow$  *GetLambda*(*M*)    *W*  $\leftarrow$  *GetPoisson*(*L*)    **for** *w*  $\in$  *W* **do**        *SetIdChamado*()        *SetData*()        *SetDiaSemana*()        *SetFaixaHorario*()        *SetTipoOcorrencia*()        *SetRegional*()        *SetBairro*()        *SetTipoAmbulancia*()        *AtualizaBD*    **end**    *DtInicial*  $\leftarrow$  *DtInicial* + 1**end**

- Dia da Semana: para as instâncias geradas, considerou-se o ano de 2017 como referência. Para os chamados com data de 01/01/2017 o dia da semana foi o domingo.
- Faixa de Horário: o dia foi dividido em 24 faixas horárias, sendo a primeira das 0:00 às 0:59 e a última das 23:00 às 23:59. Conforme o mês e o dia da semana para o qual o chamado foi gerado, foi feita a distribuição de probabilidade dele ocorrer em cada faixa definida. Por exemplo, para um chamado realizado no mês de Maio em uma quinta-feira, a probabilidade dele ocorrer na faixa horária das 10:00 às 10:59 é de 5,94%.
- Tipo de Ocorrência: conforme prontuário do SAMU-BH os chamados são divididos em 25 tipos de ocorrência entre Clínicas e Traumas. Conforme mês e dia da semanas as probabilidades de cada ocorrência também variam e foram utilizadas para definir a de cada chamado. Por exemplo, em uma terça-feira do mês de Janeiro 40% dos atropelamentos acontecem na faixa horária das 07:00 às 07:59.
- Regional: de acordo com o mês, dia da semana, faixa de horário e ocorrência, é utilizada a distribuição das probabilidades do chamado ocorrer em determinada região. Por exemplo, no mês de Novembro, às segundas-feiras na faixa das 12:00 às 12:59, 25% das quedas de altura se originam da regional do Barreiro.
- Bairro: a seleção do bairro de origem seguiu uma distribuição uniforme, obedecendo

o comportamento estatístico com relação à regional correspondente. Dessa forma, mesmo os bairros que não originaram empenhos nos dados históricos, poderiam estar presentes nas instâncias.

- Tipo de Ambulância: os dois tipos de ambulância, avançada e básica, estão aptas para atender todos os tipos de ocorrência e o empenho de cada uma será realizado conforme grau de urgência e disponibilidade das unidades. Para gerar a instância, a probabilidade de empenho de cada uma também foi considerada. Por exemplo, em 91% dos casos de parada cardiorespiratória é acionada uma USA para o atendimento do chamado.

## 4.4 Distâncias entre demandas e facilidades

Para que fosse possível conhecer os nós que estão na vizinhança uns dos outros e, assim, selecionar os pares com maiores possibilidades de terem tempos de trajeto próximos do desejado, foi adotado, como critério, a identificação das distâncias geodésicas entre os pontos. Para avaliação do raio de cobertura de cada base instalada, foi desenvolvido um algoritmo para o cálculo da distância entre cada nó de facilidade  $j \in J$  e cada nó de demanda  $i \in I$ .

Com o auxílio do complemento *ezGeocode*, disponível para planilhas do *Google*, foram coletadas as informações geográficas referentes à latitude e longitude de cada nó. A partir dessas informações, a matriz de distância foi construída conforme o [Algoritmo 2](#). O cálculo do raio foi realizado através da Fórmula de Haversine, [Equação \(50\)](#), muito utilizada em navegação e que fornece a distância entre dois pontos de uma esfera com base em suas coordenadas geográficas ([INGOLE; NICHAT, 2013](#)).

$$d = 2r \sin^{-1} \left( \sqrt{\sin^2 \left( \frac{\phi_j - \phi_i}{2} \right) + \cos(\phi_i) \cos(\phi_j) \sin^2 \left( \frac{\psi_j - \psi_i}{2} \right)} \right) \quad (50)$$

O resultado  $d$  é a distância entre dois pontos  $(j, i)$  com latitude e longitude  $(\phi, \psi)$ , em radianos, e  $r$  é o raio da Terra (6.371 km). Para a conversão das coordenadas geográficas de graus para radianos, foi utilizada a [Equação \(51\)](#).

$$\left( \frac{\pi}{180} \right) coord_{geo_{graus}} = coord_{geo_{rad}} \quad (51)$$

**Algoritmo 2:** Algoritmo para cálculo de distância radial**Input:** Coordenadas geográficas dos conjuntos  $I$  e  $J$ **Output:** Matriz de distâncias geodésicas*CriaMatriz*

```

for  $j \in J$  do
   $\phi_j \leftarrow \text{GetLatitude}(j)$ 
   $\psi_j \leftarrow \text{GetLongitude}(j)$ 
  for  $i \in I$  do
     $\phi_i \leftarrow \text{GetLatitude}(i)$ 
     $\psi_i \leftarrow \text{GetLongitude}(i)$ 
     $R_{ji} \leftarrow \text{getRaio}(\phi_j, \psi_j, \phi_i, \psi_i)$ 
    AtualizaMatriz
  end
end

```

## 4.5 Tempos de resposta entre demandas e facilidades

Para o cálculo do tempo de deslocamento entre uma base instalada e o nó de origem da demanda foi utilizado o serviço *Directions* do aplicativo *Google Maps JavaScript API*, que permite calcular rotas entre dois pontos e retorna a distância percorrida ou o tempo gasto no percurso. A partir da geração de chaves de acesso vinculadas a contas do *Google* foi possível o seu uso, gratuito, conforme políticas e parâmetros descritos em [Google Maps APIs \(2017\)](#).

Conforme testes realizados, cada chave permitiu, em média, 1.100 buscas, ou seja, foi possível registrar 1.100 tempos de deslocamento entre dada origem e dado destino, diariamente, por chave. O resultado é estimado a partir dos registros históricos, divididos em duas categorias:

- *Normal Time*: média história de tempo de percurso, calculada com base na origem e no destino definidos.
- *Traffic Time*: média histórica considerando a variação no tráfego. Além da origem e do destino, utiliza como referência o dia da semana e o horário para estimativa do tempo de percurso.

Através da ferramenta *Google Maps Directions* foi possível estimar a cobertura do SAMU-BH com a configuração de bases existentes utilizando as instâncias previamente geradas. O [Algoritmo 3](#) tem como dados de entrada a instância que se deseja calcular a cobertura (*instancia*), a matriz de distância radial ( $dr_{ji}$ ) construída conforme descrito na [Seção 4.4](#), o raio de cobertura ( $r$ ) desejado para avaliação e os tempos de resposta desejados para cada tipo de ambulância ( $tr_A, tr_B$ ). É também um parâmetro de entrada o conjunto de bases instaladas com USAs ( $bases_A \subset J$ ) e USBs ( $bases_B \subset J$ ) alocadas.

Para diminuir o número de buscas realizadas, foram consideradas candidatas a cobrir a demanda apenas as bases que se situavam dentro de um raio de 5 *km* de distância do nó de origem do chamado. Para raios maiores, a distância do trajeto entre origem e destino torna remota a possibilidade de cobertura no tempo de resposta desejado. Assim, o número de buscas realizadas que não resultariam em cobertura (feito entre bases e nós de demanda distantes um do outro) foi menor e o algoritmo se tornou mais eficiente.

Um teste inicial foi realizado com a Instância 01, com 28.908 chamados, em dois cenários. No primeiro, o cálculo do tempo de deslocamento utilizou os critérios *Normal Time*, que não considera o histórico de trânsito no tempo de deslocamento e necessita como entrada apenas o bairro do chamado para calcular o tempo de percurso até as bases candidatas. No segundo, foi usado a categoria *Traffic Time*, que considera o tempo de tráfego e necessita, além do bairro, o dia da semana e o horário da ocorrência para o cálculo. Os resultados são mostrados na [Tabela 4](#).

Tabela 4 – Resultado da cobertura - instância 01

Instância 01	<i>Normal Time</i>	<i>Traffic Time</i>
Chamados avaliados	28908	28908
Buscas realizadas	1170	38909
Chaves utilizadas	1	32
Tempo computacional	19 min	630min
Chamados cobertos	16625	16245
Taxa de cobertura	57,5%	56,2%

Fonte: Autora, 2017

Com a inclusão dos parâmetros referentes ao dia da semana e ao horário, as possibilidades de tempo de resposta entre um nó  $j$  e um nó  $i$  são muito maiores. Dada uma origem e um destino, pelo método *Normal Time* existe apenas um tempo de resposta possível para esse trajeto e, caso esses pontos se repitam, não é necessário o algoritmo recalculer a rota e, portanto, a ferramenta não é utilizada neste caso.

Já pelo método *Traffic Time*, o tempo de percurso entre uma origem e um destino possui 168 variações (dado 7 dias da semana X 24 horas por dia). Com isso, mesmo que um outro chamado tenha sido originado no mesmo nó  $i$  e tenha a mesma base  $j$  como candidata, caso a faixa de horário ou o dia de semana não coincidam com aquele já calculado, a ferramenta fará uma nova busca e as possibilidades de rotas semelhantes diminuem consideravelmente. O pseudocódigo do algoritmo utilizado é apresentado no [Algoritmo 3](#).

Baseado na análise dos resultados obtidos, considerando que o método *Traffic Time* levou um tempo computacional 3.300% maior e que a busca mais detalhada (por dia e horário) resultou em uma mudança de cobertura em apenas 1,3% dos chamados, concluiu-

se que o método não é o mais adequado para ser utilizado no desenvolvimento do trabalho. Como o deslocamento é realizado por ambulâncias e elas possuem preferência no tráfego, pode-se considerar que as unidades móveis não ficam presas em congestionamentos. Portanto, o método *Normal Time* seria o mais eficiente para o objetivo proposto, com uma margem de erro muito pequena.

---

**Algoritmo 3: Algoritmo para estimativa de cobertura**


---

**Input:**  $instancia, dr_{ji}, r, tr_A, tr_B, bases_A, bases_B$

**Output:** Quantidade de chamados cobertos

*CriaBD*

$cobertos \leftarrow 0$

**for**  $chamado \in instancia$  **do**

$i \leftarrow BairroChamado$

**if**  $tipo = USA$  **then**

$BasesCandidatas \leftarrow bases_A$

$TR \leftarrow tr_A$

**end**

**if**  $tipo = USB$  **then**

$BasesCandidatas \leftarrow bases_B$

$TR \leftarrow tr_B$

**end**

**for**  $j \in BasesCandidatas$  **do**

**if**  $dr_{ji} < r$  **then**

$TempoPercurso \leftarrow GoogleMapsTime()$

**if**  $TempoPercurso < TR$  **then**

$cobertos \leftarrow cobertos + 1$

**end**

**end**

**end**

*AtualizaBD*

**end**

---

A partir do exposto acima e considerando as limitações de uso diário do aplicativo, foi criada uma matriz de tempos de resposta entre todos os nós  $i$  e  $j$  mapeados na [Seção 5.4](#). Toda a informação coletada foi armazenada em um banco de dados para que fosse possível um fácil acesso aos dados sempre que necessário.

A enumeração de todas as possibilidades de origens e destinos tornou-se interessante ao se considerar que, apesar de um tempo computacional inicial grande, seria possível a realização de testes com modelos PLI utilizando o tempo de resposta como parâmetro e um maior número de testes sem limitações ou cotas diárias poderiam ser realizadas em caso de desenvolvimento de metaheurísticas.

O algoritmo para criação da matriz  $d_{ji}$  está apresentado no [Algoritmo 4](#). Foram realizadas um total de 652.029 buscas (dado 1.527 nós  $j$  e 427 nós  $i$ ), utilizando 98 chaves diárias. A matriz levou 07 dias consecutivos para ser construída.

---

**Algoritmo 4:** Algoritmo *Google Maps Directions*

---

**Input:**  $I, J, chaves$

**Output:** Matriz Tempo de Resposta

*CriaBD*

$ContadorBuscas \leftarrow 0$

$ChaveUtilizada \leftarrow 1$

**for**  $j \in J$  **do**

$Origem \leftarrow Endereco_j$

**for**  $i \in I$  **do**

$Destino \leftarrow Endereco_i$

**if**  $ContadorBuscas > 1250$  **then**

$ChaveUtilizada \leftarrow ChaveUtilizada + 1$

**end**

$key \leftarrow ChaveUtilizada$

$d_{ji} \leftarrow runGoogleMaps(Origem, Destino, ChaveUtilizada)$

$ContadorBuscas \leftarrow ContadorBuscas + 1$

$AtualizaMatriz$

**end**

**end**

---

## 4.6 Cobertura das Instâncias de Teste

Após a criação das instâncias de teste e da matriz de tempos de resposta, descritas acima, foi possível calcular a cobertura para qualquer configuração de bases e ambulâncias que a solução otimizada pudesse gerar.

Como parâmetros de entrada, além da instância gerada e da matriz de tempos de resposta  $d_{ij}$ , armazenadas em banco de dados, são fornecidas as soluções do método exato (nós do conjunto  $J$  que serão bases para USAs e/ou USBs) e os tempos de resposta desejados para cada tipo de ambulância. O pseudocódigo do algoritmo é apresentado no [Algoritmo 5](#).

De acordo com os dados do chamado (tipo e bairro da ocorrência) e das bases instaladas (quais nós de facilidade estão ativados e que tipo de ambulância está localizada em cada um), a matriz de distância é consultada. Caso o tempo de resposta seja igual ou inferior ao tempo fornecido como parâmetro de entrada ( $tr_A$  ou  $tr_B$ ) o chamado é considerado coberto, a consulta a ele é encerrada e o processo se inicia para outra ocorrência. A consulta para cada chamado é finalizada após o primeiro sucesso (localização

de uma base que cubra a demanda). Caso nenhuma unidade instalada seja capaz de cobrir a ocorrência, o chamado é considerado não coberto.

---

**Algoritmo 5:** Algoritmo para cálculo da cobertura

---

**Input:**  $idUSAs$ ,  $idUSBs$ ,  $tr_A$ ,  $tr_B$ ,  $instancia$ ,  $d_{ji}$

**Output:** Taxa de cobertura

$cobertos \leftarrow 0$

$menorTR \leftarrow 100$

**for**  $chamado \in instancia$  **do**

$i \leftarrow BairroChamado$

**if**  $tipo = USA$  **then**

$BasesInstaladas \leftarrow idUSAs$

$TR \leftarrow tr_A$

**end**

**if**  $tipo = USB$  **then**

$BasesInstaladas \leftarrow idUSBs$

$TR \leftarrow tr_B$

**end**

**for**  $j \in BasesInstaladas$  **do**

**if**  $d_{ji} < menorTR$  **then**

$menorTR \leftarrow d_{ji}$

**end**

**end**

**if**  $menorTR < TR$  **then**

$cobertos \leftarrow cobertos + 1$

**end**

**end**

---

## 4.7 Aspectos Éticos

O projeto desta pesquisa foi encaminhado ao Comitê de Ética em Pesquisa da Secretaria Municipal de Saúde de Belo Horizonte / SMSA-BH, de acordo com a Resolução nº 466, de 12/12/2012, do Conselho Nacional de Saúde, sendo aprovado conforme parecer número 2.361.551 emitido em 01/11/2017, apresentado no Anexo A.

## 5 Modelo Matemático

Baseado nos modelos encontrados na literatura e descritos no [Capítulo 3](#) e a partir dos dados históricos coletados, foi possível desenvolver um modelo matemático adaptado à realidade do SAMU-BH e aos objetivos definidos neste trabalho. Na [Seção 5.1](#) encontram-se os resultados estatísticos da coleta de dados dos prontuários conforme critérios estipulados no [Capítulo 4](#). Na [Seção 5.2](#) o modelo FLEET-IC será apresentado e a [Seção 5.3](#) traz informações sobre a configuração atual de bases e ambulâncias do SAMU-BH. Os parâmetros do modelo são definidos e detalhados na [Seção 5.4](#).

### 5.1 Análise dos dados coletados

O comportamento histórico dos chamados atendidos pelo SAMU-BH foi analisado estatisticamente e será apresentado nesta seção. A distribuição das ocorrências foi avaliada conforme o tipo de ambulância (avançada ou básica) e dentro dos seguintes parâmetros: total de empenhos por unidade, atendimentos por dia de semana, por faixa de horário, por regional e destino dos pacientes.

A [Tabela 5](#) apresenta os atendimentos das unidades de suporte avançado.

Tabela 5 – Atendimentos por USA

ID	Atendimentos	%
USA 01	2138	16,7
USA 02	2256	17,7
USA 03	2254	17,6
USA 04	2289	17,9
USA 05	1727	13,5
USA 06	2113	16,6

Fonte: Autora, 2017

Com exceção da USA 05 que, em comparação às demais, atendeu a um número consideravelmente menor de chamados, as demais ambulâncias tiveram quantidade de empenhos bem próximas ao longo do período. Ao considerar todas as USAs, obtém-se um desvio padrão populacional  $\sigma = 191,2$ . Desconsiderando o ponto mais discrepante, que é a USA 05,  $\sigma = 70,5$ .

A [Tabela 6](#) apresenta os atendimentos das unidades de suporte básico. Um ponto discrepante também é localizado nessas unidades. A USB 4311 atendeu a um número menor de chamados, se comparado com a média das demais unidades. Ao considerar

todas as USBs, obtém-se um desvio padrão amostral  $s = 111,4$ . Desconsiderando o ponto mais discrepante, que é a USB 4311,  $s = 72,8$ .

Tabela 6 – Atendimentos por USB

ID	Atendimentos	%
USB 2106	747	4,6
USB 2120	822	5,1
USB 2313	867	5,3
USB 2321	750	4,6
USB 2322	704	4,3
USB 2412	796	4,9
USB 2415	741	4,6
USB 2430	843	5,2
USB 2610	830	5,1
USB 2708	958	5,9
USB 2719	870	5,3
USB 2809	729	4,5
USB 2907	658	4,0
USB 4116	735	4,5
USB 4211	806	5,0
USB 4310	805	4,9
USB 4311	400	2,5
USB 4514	765	4,7
USB 4520	893	5,5
USB 4817	828	5,1
USB 4918	723	4,4

Fonte: Autora, 2017

A distribuição dos chamados atendidos por USAs por dia da semana é apresentado na [Tabela 7](#) e representa 100% dos chamados atendidos ao longo dos 12 meses coletados. A distribuição da amostra coletada dos chamados atendidos por USBs por dia útil da semana, conforme detalhado no [Capítulo 4](#), é apresentado na [Tabela 8](#).

Tabela 7 – Atendimentos por dia da semana - USAs

Dia da Semana	Atendimentos	%
domingo	1760	13.8%
segunda-feira	1940	15.2%
terça-feira	1789	14.0%
quarta-feira	1799	14.1%
quinta-feira	1805	14.1%
sexta-feira	1878	14.7%
sábado	1806	14.1%

Fonte: Autora, 2017

Tabela 8 – Atendimentos por dia da semana - USBs

Dia da Semana	Atendimentos	%
segunda-feira	3290	20.2%
terça-feira	3131	19.2%
quarta-feira	3090	19.0%
quinta-feira	3497	21.5%
sexta-feira	3262	20.1%

Fonte: Autora, 2017

Ao distribuir os chamados uniformemente pelas 52 semanas do ano mais um domingo, percebe-se um equilíbrio no empenho das unidades avançadas. Domingo é o dia com um menor número de chamados e na segunda-feira é o maior pico. A amplitude encontrada entre a média de chamados por dia é de 4 ocorrências, ou seja, a diferença média de chamados entre o dia de menor e maior pico foram de quatro empenhos, com desvio padrão de 1,2.

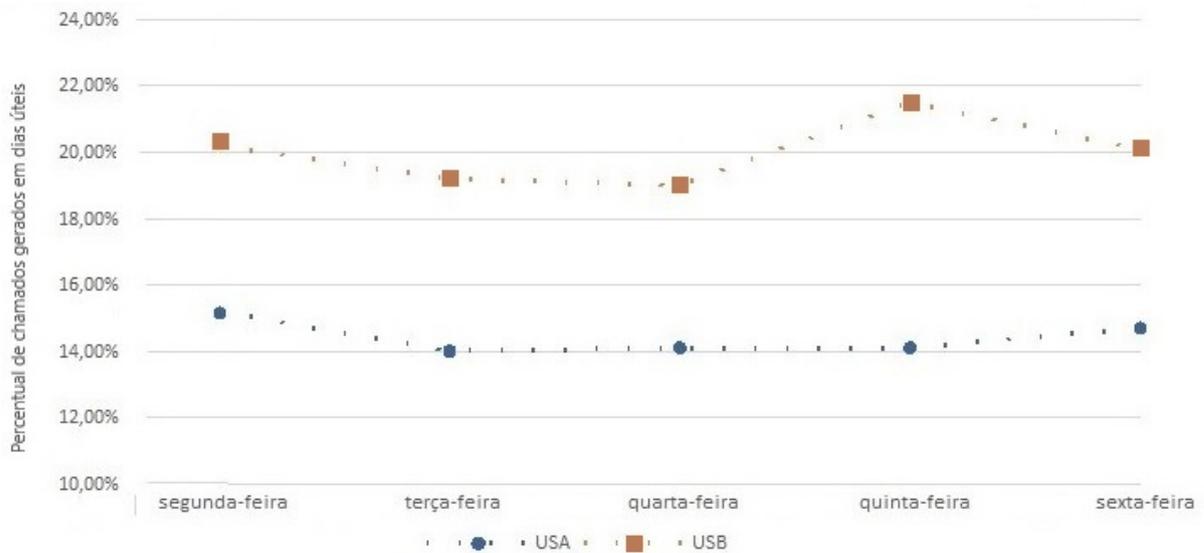
Já entre as unidades básicas o maior pico é na quinta-feira. Como não foram coletados dados referentes ao final de semana não é possível afirmar a quantidade de chamados em dias de menor demanda. Entre os dias úteis, ao distribuir os chamados uniformemente entre as 18 segundas e quintas-feiras e 17 terças, quartas e sextas, conforme as datas históricas coletadas, o desvio padrão encontrado é de 5,7.

A [Figura 5](#) traz o gráfico discreto e as linhas de tendência com a variação dos chamados por dia útil para USAs e USBs. Apesar da diferença entre os desvios padrão, o coeficiente de variação de ambos é semelhante, 3,3% e 3,1% respectivamente, ou seja, a frequência dos chamados com empenho de unidades básicas varia pouco menos que o de unidades avançadas.

Durante a coleta dos dados, foram identificados alguns campos sem o preenchimento ou preenchidos incorretamente. Esses dados foram descartados e não estão considerados na análise estatística. Na tabulação do horário de ocorrência dos empenhos, foram considerados 95% dos prontuários das USAs e 99% das USBs, apresentados na [Figura 6](#) e na [Figura 7](#), respectivamente.

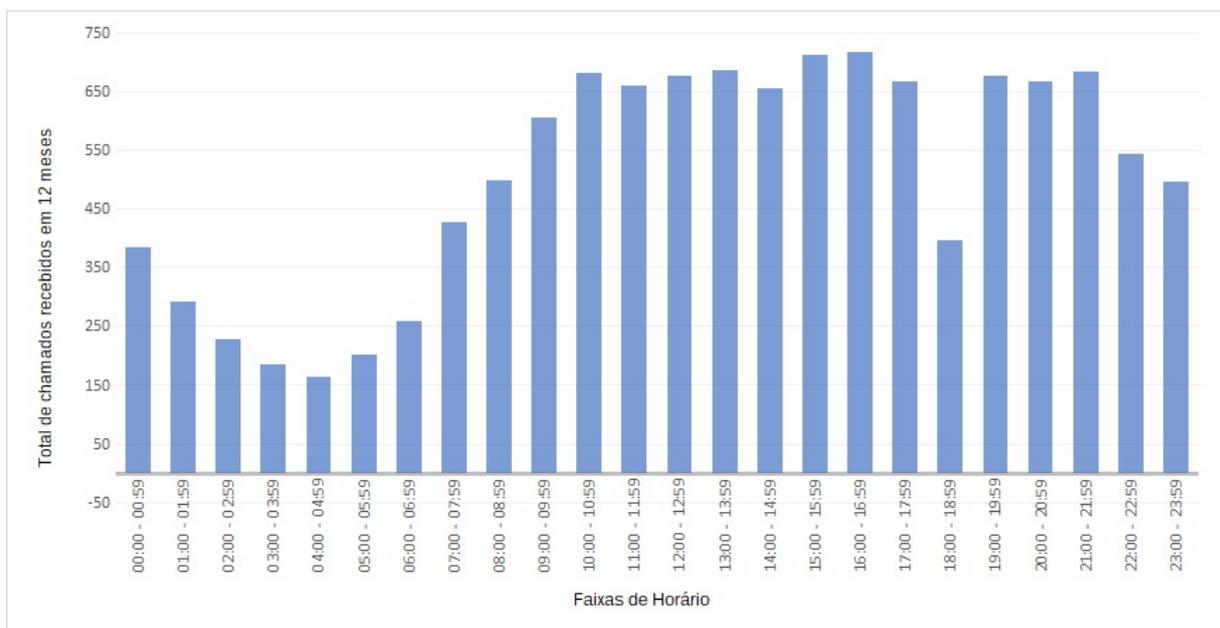
A [Tabela 9](#) e a [Tabela 10](#) apresentam a divisão dos atendimentos por turno. Entre os dados coletados, há uma predominância do turno da tarde onde se concentram, em média, 1/3 das ocorrências e a madrugada é o turno de menor demanda. Nos chamados com empenho de uma unidade avançada, a demanda torna-se progressiva a partir das 7h, um aumento de 65% no número de chamados com relação à faixa de horário anterior, com o período de ápice entre 10h e 18h. Um novo pico de aumento acontece às 19h (71% maior que a faixa de horário anterior) e a alta demanda se estende até às 22h, conforme mostra a [Figura 6](#).

Figura 5 – Chamados por dia útil



Fonte: Autora, 2017

Figura 6 – Chamados por faixa horária - USAs

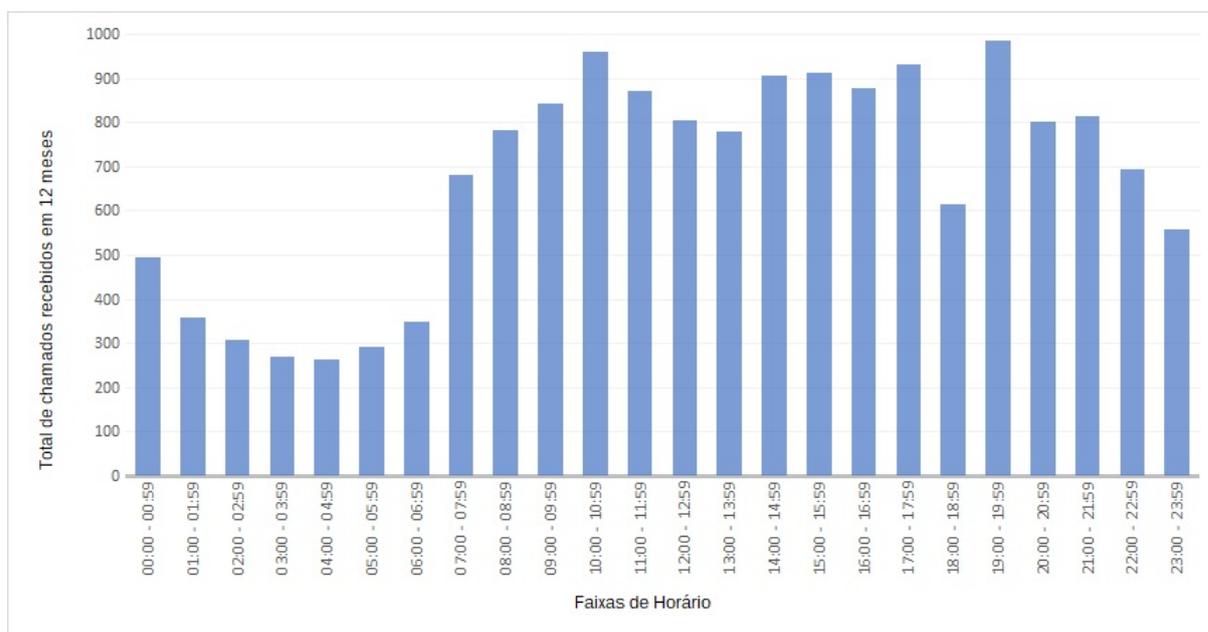


Fonte: Autora, 2017

Nos chamados atendidos por unidades básicas, a maior aumento acontece na faixa horária das 7h (uma demanda 95% maior do que a anterior), com um pico de demanda por atendimento às 10h e outro às 19h, quando acontece o segundo maior aumento percentual de uma faixa para outra, 60%, com o período de maior atendimento entre 14h e 18h, conforme apresentado na [Figura 7](#).

As trocas de equipe acontecem às 7h e às 19h, horários em que se observa o maior

Figura 7 – Chamados por faixa horária - USBs



Fonte: Autora, 2017

Tabela 9 – Atendimentos por Turno - USAs

Turno	Atendimentos	%
Manhã (06:00 - 11:59)	3127	25.7%
Tarde (12:00 - 17:59)	4116	33.9%
Noite (18:00 - 23:59)	3464	28.5%
Madrugada (00:00 - 05:59)	1449	11.9%

Fonte: Autora, 2017

Tabela 10 – Atendimentos por Turno - USBs

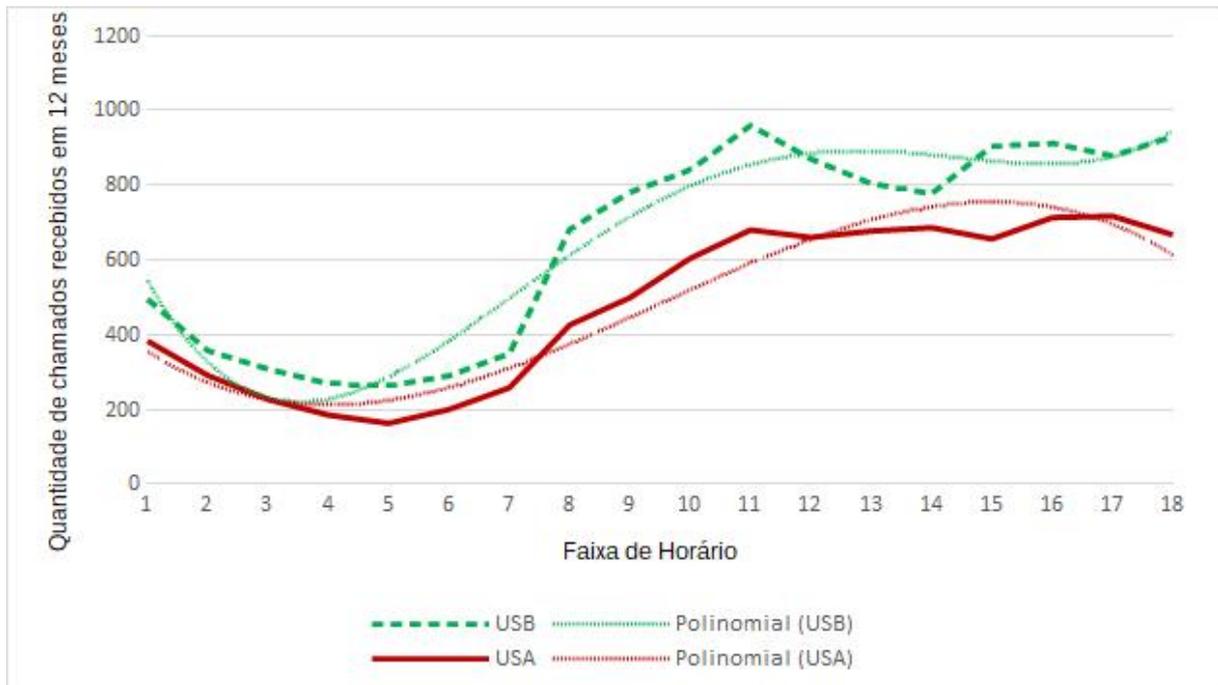
Turno	Atendimentos	%
Manhã (06:00 - 11:59)	4480	28%
Tarde (12:00 - 17:59)	5205	32%
Noite (18:00 - 23:59)	4464	28%
Madrugada (00:00 - 05:59)	1982	12%

Fonte: Autora, 2017

aumento da demanda. Ao analisar a série temporal no dia, percebe-se claramente um ponto fora da curva no número de atendimentos na faixa das 18h, conforme [Figura 8](#).

Com bases nas linhas, o limite inferior para a previsão de demanda de unidades avançadas da próxima faixa horária (18h-18h59) seria 573, uma diferença de 55% com relação ao valor real tabulado e 716 para unidades básicas, uma diferença de 60%. A principal hipótese para essa discrepância se baseia no fato de ser o período de trocas de

Figura 8 – Análise temporal: tendência para a faixa horária 18h-18h59



Fonte: Autora, 2017

equipes, uma vez que a faixa analisada refere-se ao horário de empenho da ambulância e não da ligação atendida pela Central.

Para a análise da localização de origem dos chamados, a cidade foi dividida em 09 regiões, seguindo a configuração das regionais criada pela Prefeitura de Belo Horizonte. Cada bairro informado nas ocorrências, e coletados em 93% dos prontuários das USAs e 98% dos prontuários das USBs, foi direcionado para uma regional seguindo a divisão em vigor disponível em [PBH \(2014\)](#). A [Tabela 11](#) traz a distribuição dos chamados por regional. A Centro-Sul é onde se concentra o maior número de chamados, seguida da regional Nordeste, Oeste e Barreiro que, juntas, correspondem a 57% e 54% da demanda originada de Belo Horizonte com empenho de USA e USB, respectivamente. O SAMU-BH também cobre cidades vizinhas e, no período em questão, foram atendidas um total de 835 ocorrências, 87% delas envolvendo unidades avançadas, em outras 21 cidades, com maior destaque para Ribeirão das Neves, Santa Luzia e Nova Lima.

Os chamados com empenho de USAs foram originados de 265 bairros de Belo Horizonte e, com empenho de USBs, foram totalizados 246 bairros. Os dez locais que mais demandaram atendimentos, para cada tipo, são apresentados no [Quadro 4](#).

Na [Tabela 12](#) foram listados os bairros mais populosos de Belo Horizonte e a quantidade de atendimentos demandados em cada um deles. Ao relacionar a população residente em cada bairro, conforme dados do Censo 2010 presentes em [PBH \(2011\)](#), com o número de chamados originados a partir de cada um deles, com base nos dados históricos

Tabela 11 – Atendimentos e População por Regional

Regional	Atendimentos USA	% USA	Atendimentos USB	% USB	População Total
Barreiro	1258	11.3%	1751	11.0%	282.552
Centro Sul	2169	19.4%	3107	19.6%	283.776
Leste	722	6.5%	1329	8.4%	238.539
Nordeste	1645	14.7%	1953	12.3%	290.353
Noroeste	824	7.4%	1554	9.8%	268.038
Norte	1038	9.3%	1275	8.0%	212.055
Oeste	1272	11.4%	1825	11.5%	308.549
Pampulha	1066	9.6%	1446	9.1%	226.110
Venda Nova	1162	10.4%	1632	10.3%	265.179

Fonte: Autora, 2017

Quadro 4 – Bairros de maior demanda

	USA			USB		
	Bairros	Chamados	%	Bairros	Chamados	%
1º	Centro	681	6.1%	Centro	1193	7.5%
2º	Santa Efigênia	550	4.9%	Santa Efigênia	336	2.1%
3º	Diamante	400	3.6%	Caiçaras	225	1.4%
4º	Lagoinha	366	3.3%	Serra	219	1.4%
5º	Venda Nova	347	3.1%	Sagrada Família	213	1.3%
6º	Jardim America	345	3.1%	Padre Eustáquio	210	1.3%
7º	Santa Terezinha	300	2.7%	Lagoinha	180	1.1%
8º	São Paulo	272	2.4%	Tupi	175	1.1%
9º	Primeiro de Maio	252	2.3%	Céu Azul	173	1.1%
10º	Serra	155	1.4%	Betânia	166	1.0%

Fonte: Autora, 2017

coletados, percebe-se que há uma relação linear fraca entre o número de moradores e a quantidade de atendimentos realizados. Portanto, a utilização dos dados históricos como parâmetro do modelo matemático retrata de forma mais fiel o cenário do SAMU-BH se comparado com a utilização dos dados demográficos das regiões, parâmetro que é comumente encontrado nos modelos clássicos presentes na literatura para a solução do problema de localização de facilidades em serviços de emergência.

Conforme detalhado na [Figura 2](#), após o chamado ter passado por uma filtragem e detectada a necessidade do empenho de uma ambulância, a unidade mais indicada, conforme o tipo de ocorrência e a sua localização, é acionada para realizar o pré-atendimento. Conforme as condições do paciente pode haver necessidade do seu transporte para um centro de saúde especializado. Os principais destinos dos atendimentos foram informados em 86% dos prontuários coletados das unidades avançadas e em 91% das básicas, indicadas na [Tabela 13](#) e na [Tabela 14](#), respectivamente.

Tabela 12 – População versus Número de chamados

Bairro	População	Chamados USA	Chamados USB
Sagrada Família	34.395	91	213
Buritis	29.374	39	69
Padre Eustáquio	28.773	103	210
Lindéia	24.146	64	128
Santa Mônica	23.883	70	153
Céu Azul	23.817	100	173
Santa Cruz	22.306	75	106
Santo Antônio	21.642	41	47
Alto Vera Cruz	21.459	67	92
Jardim dos Comerciários	21.238	53	71

Fonte: Autora, 2017

Tabela 13 – Destino dos pacientes atendidos por uma USA

Destino	Atendimentos	%
Hospitais	5408	49,02
Óbito	3125	28,33
UPAs	1067	9,67
Chamadas canceladas	779	7,06
Atendimento recusado	242	2,19
Alta no local	164	1,49
Vítima não localizada	111	1,01
Transportado por outros meios	87	0,79
Outros	49	0,44

Fonte: Autora, 2017

Tabela 14 – Destino dos pacientes atendidos por uma USB

Destino	Atendimentos	%
Hospitais	5059	31.1%
UPAs	4932	30.3%
Atendimento recusado	2121	13.0%
Chamadas canceladas	978	6.0%
Transportado por outros meios	680	4.2%
Cersams	294	1.8%
Vítima não localizada	257	1.6%
Óbito	230	1.4%
Transportado por outra ambulância	171	1.1%
Outros	26	0.1%

Fonte: Autora, 2017

Em aproximadamente 59% das ocorrências em que houve empenho de USAs, a vítima foi transportada até uma unidade de saúde (hospitais públicos, privados, unidades de pronto-atendimento e clínicas). Em aproximadamente 28% dos registros ocorreu o óbito do paciente, seja durante o atendimento no local da ocorrência ou durante o transporte para o hospital. Em alguns casos, definido segundo critérios médicos, o corpo é transportado pelo SAMU ao necrotério. Sabe-se que pelo menos 60% dos óbitos ocorridos no período foram decorrentes de paradas cardiorespiratórias. Os 40% restantes estão diluídos entre diversas causas sendo que a 2ª delas, agressão com arma de fogo, corresponde a 6%. Em 10% dos chamados, o atendimento não chegou a ser efetivado.

Nos chamados envolvendo o deslocamento de USBs, em 63% dos casos a vítima foi levada a hospitais, unidades de pronto atendimento (UPAs) e centros de referência em saúde mental (CERSAMs). Destaca-se o alto número de atendimentos não realizados, seja por recusa do paciente, 13%, chamado cancelado, 6%, ou vítima não localizada, 1,6%. Nesses casos, a ambulância também é empenhada e fica indisponível.

Em apenas 2% e 4% dos empenhos de USA e USB, respectivamente, as equipes fizeram o atendimento mas não realizaram o transporte do paciente, seja porque ele recebeu alta pelo médico da equipe ou pelo médico regulador da Central, ou foi transportado por outros meios (próprios, Corpo de Bombeiros, PM, plano de saúde particular etc). O transporte por outras unidades do SAMU pode acontecer em casos de defeito da ambulância, empenho a outro chamado urgente entre outras. Na categoria “Outro” estão computados os trotes que não foram filtrados, o transporte a clínicas particulares, o deslocamento interrompido por defeitos no veículo etc.

## 5.2 Modelo FLEET-IC

Baseado no modelo FLEET, apresentado no [Capítulo 3](#), foi desenvolvido um modelo matemático de PLI com adaptações para a realidade do SAMU-BH e para os objetivos definidos neste trabalho. A principal mudança está no conceito de cobertura, que foi desmembrada em cobertura avançada e cobertura básica. Por esse motivo o modelo recebeu o nome de FLEET-IC (*Facility Location and Equipment Emplacement Technique with Independent Coverages*).

Nos modelos presentes na literatura e tratados em capítulos anteriores, um nó era considerado coberto se ele fosse coberto por todos os tipos de ambulância. No modelo abaixo, um nó poderá ser coberto por um tipo de ambulância e não ser coberto por outro. Essa característica é importante para os resultados almejados, uma vez que é necessária a análise individual das coberturas, por se tratarem de veículos com quantidades, equipamentos, equipes e tempos de resposta desejados distintos. A avaliação de uma cobertura única poderia mascarar tendências e comportamentos. Além disso, com base

nas informações presentes na [Seção 5.1](#), entende-se que a demanda por unidades básicas e avançadas não segue a mesma proporção em todos os nós. Através da utilização dos dados históricos como parâmetros para o modelo, será possível direcionar a alocação de cada tipo de ambulância de acordo com os chamados ocorridos, priorizando os nós com maior demanda por cada um deles.

Vale ressaltar que, conforme informações repassadas pela gerência do SAMU-BH, não há custos para ativação, inativação ou manutenção de uma base. Os espaços são oferecidos conforme negociação entre a prefeitura e as instituições, sem envolvimento de recursos financeiros. Os custos com as equipes são os mesmos independente da localização da base. Por esse motivo, o modelo não contempla parâmetros referentes a qualquer custo para localização das facilidades.

São parâmetros do modelo:

- $I$ : conjunto de nós de demanda;
- $J$ : conjunto de nós candidatos a instalação da facilidade;
- $U$ : conjunto de tipos de ambulância;
- $P^u$ : quantidade de ambulâncias do tipo  $u \in U$  disponíveis para alocação;
- $Q$ : quantidade de bases que podem ser instaladas;
- $S^u$ : tempo crítico de resposta para cada tipo  $u \in U$  de ambulância;
- $C_j$ : quantidade de ambulâncias que cada ponto  $j \in J$  comporta, considerando que cada base poderá receber apenas uma unidade de cada tipo  $u$ , conforme o conceito de bases descentralizadas já apresentado;
- $d_{ji}$ : tempo de resposta entre a base  $j \in J$  e a demanda  $i \in I$ ;
- $q_{iu}$ : quantidade de chamados históricos originados de cada ponto  $i \in I$  com o empenho de cada tipo de ambulância  $u \in U$ .

São variáveis:

- $z_j \in \{0,1\}$ : assume valor 1 se a base  $j$  estiver ativa e 0, caso contrário;
- $x_j^u \in \{0,1\}$ : assume valor 1 se uma ambulância do tipo  $u$  for instalada no ponto  $j$  e 0, caso contrário;
- $y_{ji}^u \in \{0,1\}$ : assume valor 1 se o ponto  $j$  cobre o nó  $i$  com a ambulância do tipo  $u$ , tal que  $d_{ij} \leq S^u$
- $k_{iu} \in \{0,1\}$ : assume valor 1 se o nó  $i$  for coberto pela ambulância do tipo  $u$  e 0, caso contrário.

$$\text{maximizar cobertura} = \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} q_{iu} k_{iu} \quad (52)$$

sujeito a:

$$\sum_{j \in J} x_j^u \leq P^u, \quad \forall u \in U, \quad (53)$$

$$\sum_{u \in U} x_j^u \leq C_j, \quad \forall j \in J, \quad (54)$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq Q, \quad (55)$$

$$\sum_{u \in U} x_j^u \leq U z_j, \quad \forall j \in J, \quad (56)$$

$$y_{ji}^u d_{ji} \leq S^u x_j^u, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall u \in U, \quad (57)$$

$$k_{iu} \leq \sum_{j \in J} y_{ji}^u, \quad \forall i \in I, \forall u \in U, \quad (58)$$

$$z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \quad (59)$$

$$x_j^u \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, \forall u \in U, \quad (60)$$

$$y_{ji}^u \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall u \in U, \quad (61)$$

$$k_{iu} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, \forall u \in U, \quad (62)$$

A função objetivo (52) maximiza o número de chamados cobertos. Quanto mais chamados históricos um nó de demanda gerou para determinado tipo de ambulância, mais a função objetivo será incrementada e, portanto, o modelo priorizará a instalação de bases que cubram os pontos de maior demanda. As Inequações (53), (54) e (55) definem as restrições de capacidade do modelo, como o número máximo de ambulâncias disponíveis para alocação, a quantidade que cada base comporta e o total de bases que podem ser instaladas, respectivamente. Na restrição (56) impede-se que uma ambulância seja alocada em um ponto onde não há base ativa. A restrição (57) define que uma base só será candidata a cobrir uma demanda de determinado tipo se tiver uma ambulância desse mesmo tipo instalada na base e o tempo de deslocamento entre base e demanda atenda ao tempo crítico de resposta estipulado. E, por fim, uma demanda só poderá ser considerada coberta se existir pelo menos um candidato à essa cobertura, conforme restrição (58). Nas demais restrições, de (59) a (62) são definidos os domínios das variáveis.

### 5.3 Configuração atual

A configuração atual do SAMU-BH é composta por seis USAs e 21 USBs, espalhadas por 22 pontos da capital. Todas as nove regionais possuem pontos com unidades básicas e cinco delas alocam pelo menos uma unidade avançada. As bases comportam de uma a três unidades e em algumas delas existem mais de uma unidade básica alocada, o que não atende ao conceito de bases descentralizadas prevista no modelo matemático apresentado. A distribuição das bases e tipos de ambulância é apresentada no [Quadro 5](#). Para o próximo triênio (2018-2020) está prevista a aquisição de novas unidades móveis, sendo três USAs e três USBs, uma avançada e uma básica por ano.

Quadro 5 – Localização das bases em Novembro/2017

<b>Id</b>	<b>Endereço das bases</b>	<b>Regional</b>	<b>USAs</b>	<b>USBs</b>
1	Av. Cristiano Machado, 1925 - Cidade Nova	Nordeste	-	2
2	Av. do Contorno, 11560 - Santa Efigênia	Centro Sul	-	1
3	Av. Sinfrônio Brochado, 1355 - Barreiro	Barreiro	-	1
4	R. Antônio Olinto, 154 - Esplanada	Leste	-	1
5	R. Dom Aristίδes Pôrto, 3 - Coração Eucarístico	Noroeste	1	2
6	R. Dona Luiza, 311 - Milionários	Barreiro	1	-
7	R. Padre Pedro Pinto, 1055 - Venda Nova	Venda Nova	-	1
8	R. Padre Pedro Pinto, 175 - São Tomaz	Venda Nova	-	1
9	Rua Pastor Muryllo Cassete, 25 - São Bernardo	Norte	-	1
61	R. das Gabirobas, 1 - Vila Cloris	Norte	1	1
92	R. Piauí, 1815 - Funcionários	Centro Sul	1	-
116	Av. Eng. Carlos Goulart, 900 - Buritis	Oeste	-	1
333	R. Erê, 207 - Prado	Oeste	-	1
411	Av. Amazonas, 3155 - Barroca	Oeste	-	1
1109	R. Queluzita, 45 - São Paulo	Nordeste	-	1
1110	R. Padre Eustáquio, 1951 - Padre Eustáquio	Noroeste	-	1
1166	R. Formiga, 50 - Lagoinha	Noroeste	1	-
1455	R. Domingos Viêira, 488 - Santa Efigênia	Centro Sul	-	1
1457	R. Aurélio Lopes, 20 - Diamante	Barreiro	-	2
1485	Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - São Francisco	Pampulha	1	-
1516	Av. dos Andradas, 7260 - Vera Cruz	Leste	-	1
1520	Av. Santa Terezinha, 515 - Santa Terezinha	Pampulha	-	1

Fonte: SAMU, 2017

Algumas características do pré-atendimento foram levantadas com a equipe do Serviço de Arquivo Médico e Estatística (SAME) e seguem descritas abaixo:

- não há área restrita de atendimento por ambulância. Todas as ambulâncias podem atender aos chamados em toda cidade, mesmo que isso envolva grande deslocamento (a ambulância empenhada será sempre a que estiver disponível e mais próxima do local de ocorrência);

- as USAs estão aptas a atender qualquer tipo de chamado. Na indisponibilidade de uma USB para um atendimento básico, caso uma unidade avançada esteja disponível, ela será empenhada;
- em algumas situações, como PCR e casos com alteração do nível de consciência da vítima, são despachadas uma ambulância de cada tipo (por ter um maior número de unidades, a USB costuma chegar mais rápido ao local da ocorrência e pode dar início aos pré-atendimento enquanto a unidade avançada se desloca).

## 5.4 Parâmetros do modelo

### 5.4.1 Nós de demanda

Para cada chamado histórico coletado foram identificados o bairro e a cidade de origem da ocorrência. Na cidade de Belo Horizonte, 299 bairros foram atendidos, sendo 280 com empenho de USAs e 284 com empenho de USBs. Esses dados foram utilizados como parâmetros do modelo exato. Para a geração dos tempos de resposta entre nós e na construção das instâncias de teste, foram considerados como nós de demanda todos os bairros da cidade de Belo Horizonte conforme divisão territorial definida em (PBH, 2014).

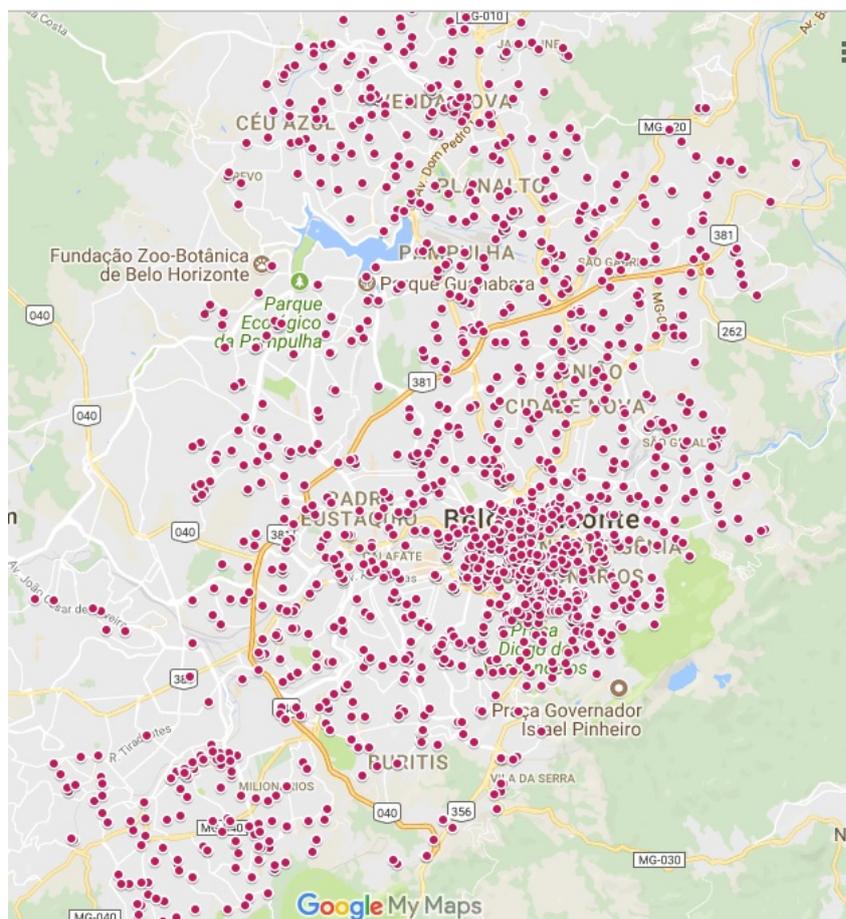
Após o levantamento inicial, totalizando 492 bairros, foram considerados apenas aqueles reconhecidos pela ferramenta *GoogleMaps* para que fosse possível calcular as distâncias geodésicas e tempos de deslocamento, conforme detalhado no Capítulo 4. Foram descartados 65 nomenclaturas e o conjunto final  $I$  resultou em 427 pontos. A distância máxima entre um ponto e outro é de 1,7 *km*.

Os pontos de origem dos chamados de cada nó foram agregados no centro. Dessa forma, o tempo de resposta será sempre calculado entre a base da ambulância despachada e este ponto central do bairro (GOLDBERG, 2004). Com essa divisão, o problema tornou-se tratável através de métodos exatos, já desenvolvidos em modelos com até 900 vértices, conforme descrito no Capítulo 2.

Considerando os seis maiores bairros em área de Belo Horizonte, conforme planilha disponível em PBH (2011), três deles abrigam serras, parques ou possuem área ociosa em mais de 80% do território. São eles: Serra do Curral (17,71 *km*<sup>2</sup>), Granja Werneck (9,72 *km*<sup>2</sup>) e Capitão Eduardo (5,07 *km*<sup>2</sup>). Os outros três possuem uma maior parcela de área urbana e foram utilizadas para o cálculo da distância entre o centro do bairro (onde está localizado o nó de demanda) e o ponto mais extremo da região. Dessa forma, no pior caso (aqueles em que não há um nó referente a outro bairro que esteja mais próximo deste ponto) será conhecida a maior distância entre um possível ponto real de demanda e a aproximação feita para o ponto central do bairro. A distância euclidiana foi de 1,2 *km* em dois bairros e de 2,0 *km* no terceiro. São eles: Mangabeiras (6,40 *km*<sup>2</sup>), Jardim Vitória



Figura 10 – Nós Candidatos a Facilidades



Fonte: Google My Maps, 2017

### 5.4.3 Outros parâmetros

Os demais parâmetros do modelo obedecem às características identificadas no atendimento móvel do SAMU-BH e foram contempladas no modelo apresentado.

- Tipos de ambulância ( $U$ ): serão considerados dois tipos de ambulância, as unidades avançadas e as básicas;
- Quantidade de ambulâncias disponíveis ( $P^u$ ): será levado em consideração a quantidade atual de USAs e USBs disponíveis, seis e 21, respectivamente. Em um segundo cenário, será considerada as novas aquisições previstas para o próximo triênio, com nove USAs e 24 USBs;
- Quantidade de bases que podem ser instaladas ( $Q$ ): será considerado o somatório do número de USAs e USBs. Em caso de desenvolvimento de um modelo para alocação dinâmica, esse número poderá ser maior;
- Tempo crítico de resposta ( $S^u$ ): os tempos críticos de resposta foram definidos pela gerência do SAMU-BH, sendo dez minutos para empenho das unidades avançadas e oito minutos no empenho das unidades básicas;

- Capacidade de locação por base ( $C_j$ ): serão consideradas duas unidades por base, sendo uma de cada tipo, de acordo com o conceito de bases descentralizadas apresentado em [Portaria nº 2.657 do Ministério da Saúde \(2004\)](#);
- Tempos de Resposta ( $d_{ji}$ ): tempo de deslocamento entre cada nó de facilidade  $j$  e nó de demanda  $i$ , calculado pelo *Google Maps* e detalhado na [Seção 4.5](#);
- Quantidade de chamados históricos ( $q_{iu}$ ): somatório do número de atendimentos por bairro e tipo de ambulância, conforme dados históricos coletados. Dos 427 bairros mapeados, 299 deles tiverem pelo menos um chamado com empenho de alguma ambulância no período considerado. Como o bairro anotado no prontuário é aquele informado na ligação, bairros maiores e mais conhecidos acabam sendo citados mais frequentemente e representando as ocorrências de um território maior do que seus limites geográficos. Para os 128 demais bairros em que não houve registro de ocorrência, o parâmetro para solução do método exato receberá valor zero. Eles serão considerados no cálculo da cobertura das instâncias de teste, como foi detalhado na [Seção 4.3](#). Do total de 29.048 registros, 92% possuíam bairros cadastrados dentro os 427 mapeados e reconhecidos pela ferramenta *Google Maps*. Portanto, os chamados que serão considerados no parâmetro totalizam 26.736, sendo 11.082 ocorrências com empenho de USA e 15.654 de USB.

## 6 Resultados

O modelo FLEET-IC apresentado no [Capítulo 5](#) foi rodado em IBM ILOG CPLEX<sup>®</sup> 12.7.1, na sua configuração padrão, em um computador Dell Inspiron i14-5458-B40, com processador Intel Core i5 5200U de 2.2GHz, com 8GB de memória RAM, sistema operacional Windows. Para possível comparação dos resultados, foram construídos os seguintes cenários:

- Cenário 1: configuração atual das bases e ambulâncias. Neste caso, as variáveis  $x_j^u$  que receberiam ambulâncias conforme a configuração vigente foram definidas como restrições do modelo, também executado pelo CPLEX<sup>®</sup>.
- Cenário 2: otimização das ambulâncias através do remanejamento delas entre as bases já existentes;
- Cenário 3: configuração otimizada das ambulâncias existentes entre as 1.527 bases candidatas;
- Cenário 4: análise dos cenários 1 e 3 considerando uma indisponibilidade (taxa de ocupação) para cada unidade;
- Cenário 5: configuração atual das bases e ambulâncias, com definição das localizações ótimas apenas para as novas ambulâncias que serão adquiridas até 2020. Nesse cenário, as ambulâncias que já estão alocadas permanecem nas bases já existentes e o modelo matemático definirá o ponto ótimo para instalação das bases que receberão as novas ambulâncias;
- Cenário 6: configuração otimizada de todas as ambulâncias, tanto as já existentes como as que serão disponibilizadas até 2020.

É importante destacar que a aquisição de três unidades de cada tipo de ambulância no próximo triênio não é uma sugestão da autora e sim uma informação passada pela gerência em saúde. Os custos envolvidos nesse processo já se encontram no planejamento público e fazem parte da previsão orçamentária municipal. Dessa forma, não foram considerados os valores financeiros da aquisição das novas ambulâncias.

### 6.1 Cenários 01 e 02

A [Tabela 15](#) traz os resultados dos cenários 1, cobertura atual, e 2, remanejamento das ambulâncias entre as bases já existentes. Os cenários 1 e 2 possuem o mesmo número de ambulâncias e as mesmas bases. No cenário 2, as ambulâncias foram realocadas conforme seu tipo e de acordo com os tempos de respostas calculados. A otimização gerou uma cobertura de mais 2.494 chamados, um aumento total de 9%, com destaque para os atendimentos com empenho da unidade avançada, com uma cobertura 13% maior.

Tabela 15 – Resultado - Cenário 1 *versus* Cenário 2

Resultados	Cenário 1 (atual)	Cenário 2 (alocação otimizada)
Total de chamados:	26.736	26.736
Nº de USAs:	06	06
Nº de USBs:	21	21
Bases Instaladas:	22	22
Tempo computacional:	-'	11"
Valor da Função Objetivo:	18.521	21.015
Taxa de cobertura USA:	61%	74%
Taxa de cobertura USB:	75%	82%
<b>Taxa de cobertura total:</b>	<b>69%</b>	<b>78%</b>

Fonte: Autora, 2017

O **Quadro 6** apresenta a alocação das ambulâncias nas bases atuais. Na 2ª e 3ª colunas, estão assinaladas com um *X* as bases em que estão alocadas USAs e USBs, respectivamente, conforme configuração do SAMU no ano de 2017. Na 4ª e 5ª colunas estão assinaladas as bases em que receberiam as unidades avançadas e básicas de acordo com a alocação otimizada.

Quadro 6 – Remanejamento das ambulâncias nas bases existentes - solução ótima

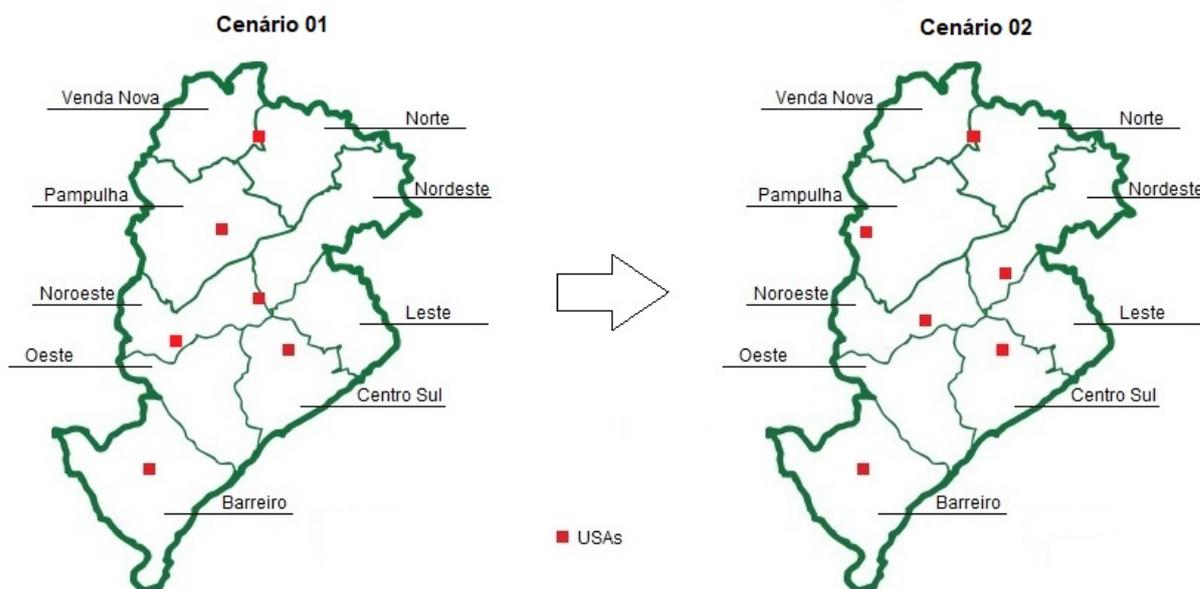
Id Bases	Alocação atual		Alocação otimizada	
	USA	USB	USA	USB
1		X	X	X
2		X		
3		X		X
4		X		
5	X	X		X
6	X		X	X
7		X		
8		X		X
9		X		X
61	X	X	X	X
92	X		X	X
116		X		X
333		X		X
411		X		X
1109		X		X
1110		X	X	X
1166	X			X
1455		X		X
1457		X		X
1485	X			X
1516		X		X
1520		X	X	X

Fonte: Autora, 2017

Na nova configuração das USAs, 50% das ambulâncias foram remanejadas. As unidades alocadas nas regionais do Barreiro, Norte e Centro Sul permaneceram, as uni-

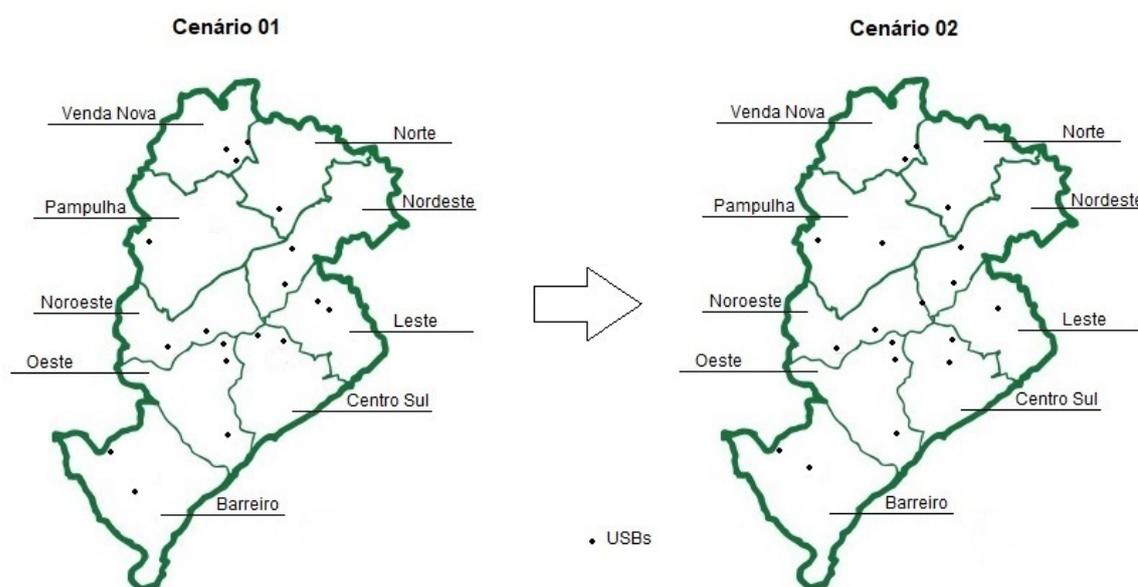
dades alocadas no Nordeste e Noroeste continuaram na mesma regional com uma troca de endereços e a unidade alocada na regional Pampulha foi remanejada para a regional de Venda Nova. É possível comparar a localização aproximada das bases antes e após a otimização das USAs, na [Figura 11](#), e das USBs, na [Figura 12](#).

Figura 11 – Remanejamento das USAs após otimização



Fonte: Autora, 2018

Figura 12 – Remanejamento das USBs após otimização



Fonte: Autora, 2018

No caso das USBs, catorze pontos que já alocam uma ou duas unidades continuaram sendo bases e quatro novos pontos receberam uma ambulância básica. Entre eles, os

localizados nas regionais do Barreiro e Centro Sul já possuem USA e também passaram a alocar uma USB. Nas bases das regionais Noroeste e Pampulha, a otimização resultou na troca do tipo de ambulância: antes, as bases alocavam USA e passaram a alocar USB. Com os remanejamentos, quatro bases foram desativadas, nas regionais Barreiro, Centro Sul, Leste e Venda Nova

Para a estimativa dos pontos que deveriam receber mais de uma unidade básica é necessário um estudo dinâmico de alocação das ambulâncias para que seja possível mensurar o fluxo dos chamados e determinar em quais regionais há maior probabilidade de chamados simultâneos.

## 6.2 Cenários 01 e 03

Os estudos do cenário 03 envolveram a utilização de todos os parâmetros descritos na [Seção 5.4](#). A diferença deste para os dois anteriores é que o número de pontos candidatos a instalação de bases subiu de 22, que são as bases atuais, para 1.527, que é o número de locais mapeados. Dessa forma, foi possível explorar mais o território da cidade e localizar as bases em pontos ainda mais estratégicos.

O resultado dos testes realizados se encontra na [Tabela 16](#). Com o mesmo número de ambulâncias existentes hoje e, portanto, sem necessidade de investimento na aquisição de novas unidades, a localização otimizada das bases cobriria uma demanda 25% maior dos chamados ocorridos no período dos 12 meses analisados, com destaque para a cobertura integral dos chamados com empenho de unidades básicas.

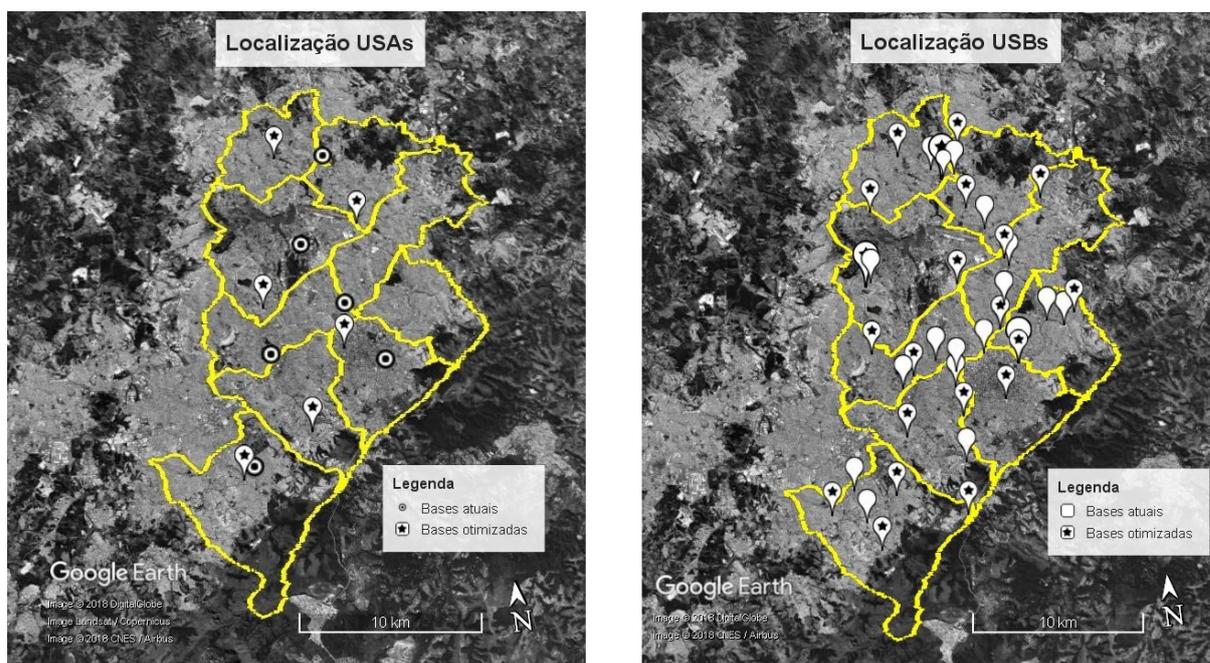
Tabela 16 – Resultado - Cenário 1 *versus* Cenário 3

Resultados	Cenário 1 (atual)	Cenário 3 (otimizado)
Total de chamados:	26.736	26.736
Nº de USAs:	06	06
Nº de USBs:	21	21
Bases Instaladas:	22	27
Tempo computacional:	-	31"
Valor da Função Objetivo:	18.521	25.242
Taxa de cobertura USA:	61%	87%
Taxa de cobertura USB:	75%	100%
<b>Taxa de cobertura total:</b>	<b>69%</b>	<b>94%</b>

Fonte: Autora, 2017

As localizações exatas das bases conforme as coordenadas geográficas de cada ponto e a divisão por região administrativa disponibilizada pela PBH são apresentadas na [Figura 13](#).

Figura 13 – Localização atual *versus* Localização ótima



Fonte: Adaptado Google Earth, 2018

O endereço das bases ótimas para instalação das USBs e USAs pode ser conferido no [Quadro 7](#) e no [Quadro 8](#).

Quadro 7 – Localização otimizada das USBs - Cenário 2

Tipo	Id	Local	Endereço
USB	50	AC - Milionários	Rua David Fonseca, 1386 - Milionários
USB	259	Centro de Saúde Pilar	Rua São Pedro da Aldeia, 55 - Pilar
USB	280	Centro de Saúde São Francisco	Rua Viana do Castelo, 485 - São Francisco
USB	317	Centro Geral de Reabilitação	Rua Domingos Vieira 463 - Sta. Efigênia
USB	342	Centro Universitário Internacional	Rua São José, 533 - Centro
USB	343	Centro Universitário Izabela Hendrix	Av. Álvaro Camargos, 205 - São João Batista
USB	460	Drogaria Araújo	Av. do Contorno, 6115 - Santa Efigênia
USB	599	EE Flávio Dos Santos	Rua Jacuí, 1131 - Concórdia
USB	629	EE Laíce Aguiar	Rua Maria Da Silveira, 44 - Novo Glória
USB	642	EE Maria Andrade Resende	Rua Reinato Fantoni, 51 - Enseada Das Garças
USB	717	EE Professora Maria Coutinho	Rua Luiz Gonzaga De Souza, 75 - Jaqueline
USB	763	EM Carlos Drummond de Andrade	Rua José Galding, 21 - Letícia
USB	789	EM Francisca Alves	Av. Santa Terezinha, s/nº - Santa Terezinha
USB	898	EM Solar Rubi	Av. Warlei Aparecido Martins, 67 - Vila Pinho
USB	901	EM Tristão da Cunha	Rua Dr. José Ferolla, 80 - Planalto
USB	905	EM Vinícius de Moraes	Rua Sebastião Moreira, 409 - Tirol
USB	906	EM Wladimir de Paula Gomes	Rua Uarirá, 350 - Caetano Furquim
USB	1081	Faculdade Pitágoras	Av. Raja Gabaglia, 1306 - Cidade Jardim
USB	1294	Polícia Militar - 9ª Cia/ 34º Batalhão	Av. Presidente Juscelino Kubitschek, 3230 - Padre Eustáquio
USB	1431	UMEI RIBEIRO DE ABREU	Rua Dianópolis, 170 - Ribeiro de Abreu
USB	1519	UPA Nordeste	Rua Joaquim Gouvêia, 560 - São Paulo

Fonte: Autora, 2017

Quadro 8 – Localização otimizada das USAs - Cenário 2

Tipo	Id	Local	Endereço
USA	135	Câmara Municipal de BH	Av. dos Andradas, 3100 - Santa Efigênia
USA	255	Centro de Saúde Padre Tiago	Av. João XXIII, 1233 - Alípio de Melo
USA	528	EE Alberto Delpino	Rua Francisco Duarte Mendonça, 2282 - Barreiro de Baixo
USA	697	EE Professor Hílton Rocha	Av. Cristiano Machado, 8200 - Primeiro de Maio
USA	1128	Gerência de Atenção à Saúde	Rua Erico Veríssimo, 1428 - Rio Branco
USA	1240	Mater Dei Santo Agostinho	Rua Gonçalves Dias, 2700 - Santo Agostinho

Fonte: Autora, 2017

### 6.3 Cenário 04

Nos cenários anteriores, para que uma demanda fosse considerada coberta era necessário que apenas uma ambulância estivesse instalada em uma base localizada dentro do tempo limite de cobertura. No cenário 04, será levado em consideração o fato de que essa ambulância pode estar em atendimento. Caso isso aconteça, apesar de existir uma unidade localizada dentro do limite de cobertura, a demanda não será coberta pois a ambulância não estará disponível para atendê-la.

Para que fosse possível rodar o modelo matemático considerando a taxa de ocupação, foi necessária a criação de uma nova restrição que informa o número mínimo de ambulâncias,  $b_u$ , necessárias para que um nó seja considerado coberto. As equações utilizadas para o cálculo do parâmetro  $b_u$  e os valores encontrados foram apresentados na [Seção 4.2](#). A nova restrição para o modelo FLEET-IC segue abaixo. A variável binária  $k_{iu}$  assume valor 1 se o nó  $i$  for coberto pela ambulância do tipo  $u$ . E a variável  $y_{ji}^u$ , também binária, assume valor 1 se o ponto  $j$  cobre o nó  $i$  com a ambulância do tipo  $u$ , tal que  $d_{ij} \leq S^u$ .

$$k_{iu}b_u \leq \sum_{j \in J} y_{ji}^u, \quad \forall i \in I, \forall u \in U, \quad (63)$$

A [Equação \(63\)](#) garante que cada nó só será considerado coberto por um tipo de ambulância se existirem, no mínimo,  $b_u$  pontos instalados que possuam o tempo de deslocamento  $d_{ji}$  igual ou inferior ao tempo de resposta  $S^u$  informado.

A partir dos valores encontrados, o modelo matemático com taxa de ocupação foi rodado para os três maiores níveis de confiança, uma vez que para  $\theta = 0,80$  e  $\theta = 0,85$  os valores de  $b^u$  são os mesmos. Os resultados para o cenário atual são apresentados na [Tabela 17](#).

Para este cenário, foram levadas em consideração as unidades centralizadas em um único ponto, como acontece com as duas unidades básicas instaladas nas bases 01, 05 e 1457. Esses pontos já dão dupla cobertura aos nós que se encontram dentro do tempo de resposta desejado, e são importantes para o cálculo uma vez que o número mínimo de

Tabela 17 – Resultado com taxa de ocupação - Cenário 1

Resultados	Cenário 01 (atual)		
Nível de confiança $\theta$ :	0,95	0,9	0,85
Número mínimo de USAs para cobertura:	2	2	1
Número mínimo de USBs para cobertura:	3	2	2
Total de chamados:	26.736	26.736	26.736
Nº de USAs:	6	6	6
Nº de USBs:	21	21	21
Bases Instaladas:	22	22	22
Tempo Computacional:	5"	5"	5"
Valor da Função Objetivo:	3.802	8.390	14.416
Taxa de cobertura USA	7%	7%	61%
Taxa de cobertura USB	20%	49%	49%
Taxa de cobertura total:	14%	31%	54%

Fonte: Autora, 2018

USBs utilizado como parâmetro varia entre 2 e 3 unidades.

A solução do cenário 4 com taxa de ocupação se encontra na [Tabela 18](#). Com a inclusão de critérios probabilísticos no modelo, o cenário atual apresenta uma redução na taxa de cobertura de 15% a 55%, conforme os níveis de confiança definidos. Já o cenário otimizado apresenta uma redução de 9% a 32%, seguindo os mesmos critérios.

Tabela 18 – Resultado com taxa de ocupação - Cenário 4

Resultados	Cenário 04 (otimizado)		
Nível de confiança $\theta$ :	0,95	0,90	0,85
Número mínimo de USAs para cobertura:	2	2	1
Número mínimo de USBs para cobertura:	3	2	2
Total de chamados:	26.736	26.736	26.736
Nº de USAs:	6	6	6
Nº de USBs:	21	21	21
Bases Instaladas:	27	26	25
Tempo Computacional:	3703"	178"	98"
Valor da Função Objetivo:	16.567	19.706	22.819
Taxa de cobertura USA	58%	58%	87%
Taxa de cobertura USB	64%	85%	85%
Taxa de cobertura total:	62%	74%	85%

Fonte: Autora, 2018

## 6.4 Cenários 01 e 05

Sabe-se que em muitas situações, por questões políticas e trabalhistas, a mudança dos locais de atuação de um serviço pode envolver desgastes e um esforço muito além do possível. Por isso, foi considerado um quinto cenário para o modelo, em que a localização de todas as bases já instaladas não foram modificadas (inclusive as que possuem duas ou mais ambulâncias permaneceram dessa forma) e o foco foi otimizar a localização das próximas unidades que serão adquiridas entre os anos de 2018 e 2020.

Para que seja possível analisar as diferentes configurações, os resultados serão apresentados conforme evolução anual: uma unidade avançada e uma unidade básica por ano, de 2018 a 2020, cenários nominados como 5-1 a 5-3, respectivamente. A cada cenário, as unidades adquiridas no ano anterior também são otimizadas. Portanto, as únicas ambulâncias que permanecem fixas nos três cenários são as unidades já existentes até o ano de 2017. Os resultados podem ser verificados na [Tabela 19](#).

Tabela 19 – Resultado - Cenário 1 (atual) *versus* Cenário 5 (otimizado)

Resultados	Cenário 1	Cenário 5-1	Cenário 5-2	Cenário 5-3
Total de chamados:	26.736	26.736	26.736	26.736
Nº de USAs:	6	7	8	9
Nº de USBs:	21	22	23	24
Bases Instaladas:	22	24	26	28
Tempo computacional:	-	32"	30"	29"
Valor de Função Objetivo:	18.521	20.560	22.055	23.191
Taxa cobertura USA:	61%	72%	79%	85%
Taxa de cobertura USB:	75%	80%	85%	88%
<b>Taxa cobertura total:</b>	<b>69%</b>	<b>77%</b>	<b>82%</b>	<b>87%</b>

Fonte: Autora, 2017

A partir da configuração atual e com a otimização da localização das novas unidades previstas por ano, a taxa de cobertura foi incrementada em 8% em 2018, 7% em 2019 e 5% em 2020. Com mais três unidades avançadas e três básicas, uma de cada tipo por ano instaladas nos pontos ótimos, a cobertura seria 18% maior do que a atual, com base nos chamados históricos.

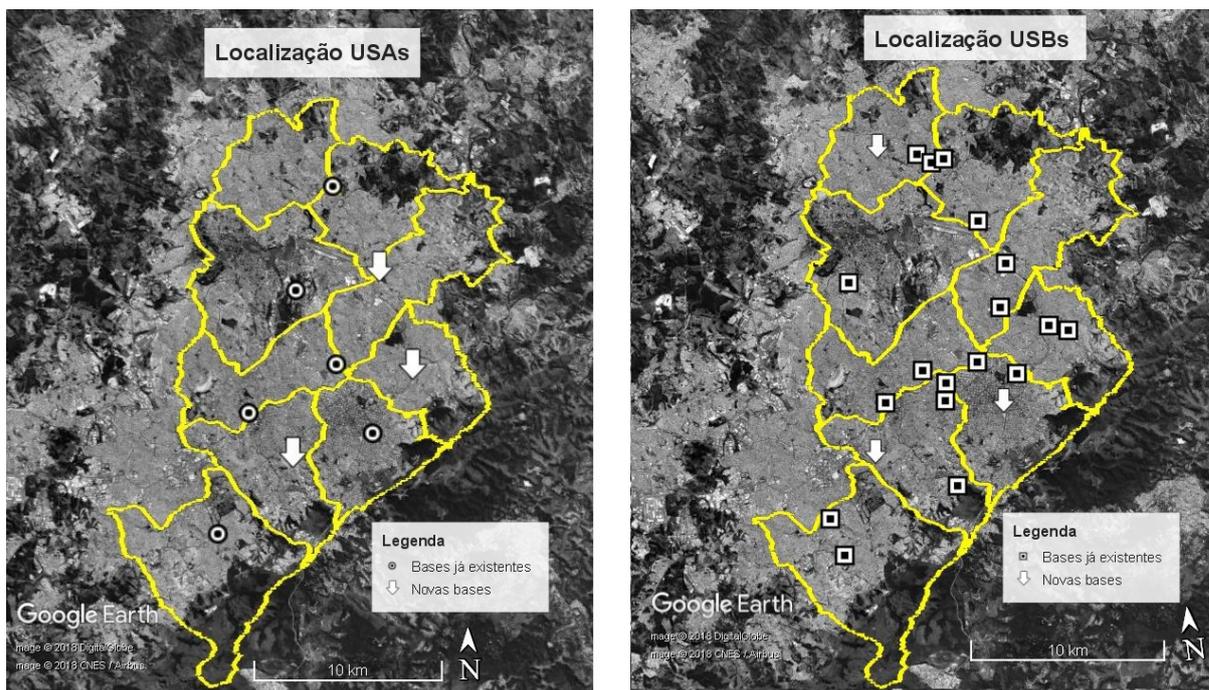
A bases otimizadas no cenário 5-1 e 5-2 permaneceram localizadas nos mesmos pontos quando foram implementados os cenários posteriores. O endereço dos novos pontos é apresentado no [Quadro 9](#). As localizações exatas das bases conforme as coordenadas geográficas de cada ponto e a divisão por região administrativa disponibilizada pela PBH são apresentadas na [Figura 14](#).

Quadro 9 – Localização otimizada das bases - Cenário 5

Ano	Tipo	Id	Local	Endereço
2018	USA	73	AC - São Paulo	Rua Aiuruoca, 501 - São Paulo
2018	USB	267	Centro de Saúde Rio Branco	Rua Jovino Coelho Júnior, 45 - Rio Branco
2019	USA	465	Drogaria Araújo	Avenida dos Andradas, 3850 - Centro
2019	USB	849	EM Padre Henrique Brandão	Rua Crispim Jaques, 987 - Vista Alegre
2020	USA	773	EM Deputado Milton Salles	Rua Teófilo Filho, 222 - Jardim América
2020	USB	460	Drogaria Araújo	Avenida do Contorno, 6115 - Santa Efigênia

Fonte: Autora, 2017

Figura 14 – Localização das bases - Cenário 05



Fonte: Adaptado Google Earth, 2018

## 6.5 Cenários 01 e 06

No cenário 06, a localização de todas as ambulâncias entre já existentes e que serão adquiridas no próximo triênio foram otimizadas. Para melhor análise, o cenário também foi dividido em três etapas, considerando o número de ambulâncias já existentes e as novas aquisições a serem realizadas de 2018 a 2020, cenários nominados como 6-1 a 6-3, respectivamente.

Como a solução ótima das bases e ambulâncias atuais (Cenário 3) cobriu a 100% dos chamados com empenho de USB, o tempo limite de resposta para o deslocamento das unidades básicas foi reduzido de oito minutos para seis minutos no Cenário 6. O tempo de resposta das unidades avançadas não foi alterado. Na [Tabela 20](#) encontra-se o comparativo entre a solução atual, com o tempo de resposta das unidades básicas em até oito minutos, e a otimização com a adição de uma unidade avançada e uma básica por ano e a redução

do tempo de resposta das USBs para seis minutos. No **Quadro 10** são apresentados os locais ótimos das bases com os recursos disponíveis em 2018.

Tabela 20 – Resultado - Cenário 1 (atual, com tempo de resposta das USBs = 8”) versus Cenário 6 (otimizado, com tempo de resposta das USBs = 6”)

Resultados	Cenário 1	Cenário 6-1	Cenário 6-2	Cenário 6-3
Total de chamados:	26.736	26.736	26.736	26.736
Nº de USAs:	6	7	8	9
Nº de USBs:	21	22	23	24
Bases Instaladas:	22	28	30	32
Tempo computacional:	-'	30”	31”	31”
Valor da Função Objetivo:	18.521	24.631	25.145	25.554
Taxa de cobertura USA:	61%	92%	95%	97%
Taxa de cobertura USB:	75%	92%	94%	95%
<b>Taxa de cobertura total:</b>	<b>69%</b>	<b>92%</b>	<b>94%</b>	<b>96%</b>

Fonte: Autora, 2017

Quadro 10 – Localização otimizada das bases - Cenário 6-1

Tipo	Id	Local	Endereço
USA	146	Centro de Conv. Artur Bispo do Rosário	Av. Anhanguera 356 - Horto
USA	255	Centro de Saúde Padre Tiago	Av. João XXIII, 1.233 - Alípio de Melo
USA	519	Drogaria Araújo	Rua Úrsula Paulino, 1321 - Betânia
USA	697	EE Professor Hílton Rocha	Av. Cristiano Machado, 8200 - Primeiro De Maio
USA	1128	Gerência de Atenção à Saúde	Rua Erico Veríssimo, 1428 – Rio Branco
USA	1250	Mercure BH Lourdes	Av. do Contorno, 7315 - Lourdes
USA	1446	UMEI TIROL	Av. Solferina Ricci Pace,70 - Vale do Jatobá
USB	20	AC - Amilcar Viana	Rua Nelson de Senna, 120 - Betânia
USB	202	Centro de Saúde Floramar I	Av. Joaquim Clemente, 381 - Floramar
USB	255	Centro de Saúde Padre Tiago	Av. João XXIII, 1.233 - Alípio de Melo
USB	366	Cerimonial Hotel Inconfidente Mineiro	Av. Deputado Anuar Menhem, 1075 - Santa Amélia
USB	403	Corpo de Bombeiros	Av. Américo Vespúcio, 2289 - Aparecida
USB	517	Drogaria Araújo	Rua Rodrigues Caldas, 430 - Santo Agostinho
USB	528	EE Alberto Delpino	Rua Francisco Duarte Mendonça, 2282 - B. de Baixo
USB	542	EE Barão Do Rio Branco	Av. Getúlio Vargas, 1059 - Funcionários
USB	546	EE Britaldo Soares Ferreira Diniz	Rua Piracema, 331 - Suzana,
USB	564	EE Coronel Vicente Torres Júnior	Rua Leopoldo Gomes, 1302 - Vera Cruz
USB	599	EE Flávio Dos Santos	Rua Jacuí, 1131 - Concórdia
USB	607	EE Getúlio Vargas	Rua Guido Leão, 22 - Serra Verde
USB	619	EE José Bonifácio	Rua Hermilo Alves, 168 - Santa Tereza
USB	642	EE Maria Andrade Resende	Rua Reinato Fantoni, 51 - Enseada Das Garças
USB	714	EE Professora Maria Auxiliadora Lanna	Rua Rutilo, 31 - Pindorama
USB	763	EM Carlos Drummond de Andrade	Rua José Galding, 21 - Letícia
USB	787	EM Emídio Berutto	Rua Conceição do Pará, 1726 - Santa Inês
USB	789	EM Francisca Alves	Av. Santa Terezinha, S/Nº - Santa Terezinha
USB	857	EM Presidente Itamar Franco	Av. Perimetral, 2911 - Vila Santa Rita
USB	1146	Hospital da Criança	Rua Viamão, 510 - Barroca
USB	1230	Intercity BH Expo	Av. Amazonas, 7702 - Gameleira
USB	1372	UMEI BELMONTE	Rua Dom Silvério Gomes Pimenta, 375 - Belmonte

Fonte: Autora, 2017

No Cenário 6-1 um mesmo ponto recebeu uma unidade avançada e uma básica, correspondente ao ID 255, totalizando 29 ambulâncias em 28 pontos. No [Quadro 11](#) e no [Quadro 12](#) são apresentados os locais ótimos das bases com os recursos disponíveis em 2019 e 2020, respectivamente.

Quadro 11 – Bases modificadas - Cenário 6-2

Tipo	Id		Local	Endereço
USA	405	↑	Corpo de Bombeiros	Rod. Papa João Paulo II, 4143 - Serra Verde
USA	697	↓	EE Professor Hílton Rocha	Av. Cristiano Machado, 8200 - Primeiro de Maio
USA	1519	↑	UPA Nordeste	Rua Joaquim Gouvêia, 560 - São Paulo
USB	20	↓	AC - Amílcar Viana	Rua Nelson de Senna, 120 - Betânia
USB	619	↓	EE José Bonifácio	Rua Hermilo Alves, 168 - Santa Tereza
USB	714	↓	EE Professora Maria Auxiliadora Lanna	Rua Rutilo, 31 - Pindorama
USB	1133	↑	Gerência Distrital de Atenção à Saúde	Rua Lauro Jacques 20 - Floresta
USB	1228	↑	Instituto Superior De Ciências Da Saúde	Av. Barão Homem de Melo, 4324 - Estoril
USB	1384	↑	UMEI Cinquentenário	Av. Dom João VI, 621 - Cinquentenário
USB	1426	↑	UMEI Pindorama	Rua Guararapes, 1850 - Pindorama

Legenda:

↑: base que entrou, com relação ao cenário 6-1

↓: base que saiu, com relação ao cenário 6-1

Fonte: Autora, 2017

Quadro 12 – Bases modificadas - Cenário 6-3

Tipo	Id		Local	Endereço
USA	146	↓	Centro de Conv. Artur Bispo do Rosário	Av. Anhanguera 356 - Horto
USA	405	↓	Corpo de Bombeiros	Rod. Papa João Paulo II, 4143 – Serra Verde
USA	554	↑	EE Carlos Drummond De Andrade	Rua Professora Gabriela Varela, 360 - Floramar
USA	746	↑	EM Aires da Mata Machado	Av. Senador Levindo Coelho, 632 - Vale do Jatobá
USA	880	↑	EM Professora Eleonora Pieruccetti	Av. Bernardo Vasconcelos, 288 - Cachoeirinha
USA	883	↑	EM Professora Maria Mazarello	Rua Benedito Neves, 45 - Nazaré
USA	892	↑	EM São Rafael	Rua Cel. Otávio Diniz, S/Nº - Pompéia
USA	1446	↓	UMEI Tirol	Av. Solferina Ricci Pace, 70 - Vale do Jatobá
USA	1519	↓	UPA Nordeste	Rua Joaquim Gouvêia, 560 - São Paulo
USB	82	↑	AC - Via 240	Via 240, 437 - Novo Aarão Reis
USB	477	↑	Drogaria Araújo	Av. Raja Gabágliã, 4427 – Cidade Jardim
USB	528	↓	EE Alberto Delpino	Rua Francisco Duarte Mendonça, 2282 - B. de Baixo
USB	619	↑	EE José Bonifácio	Rua Hermilo Alves, 168 - Santa Tereza
USB	714	↑	EE Professora Maria Auxiliadora Lanna	Rua Rutilo, 31 - Pindorama
USB	870	↑	EM Professor Milton Lage	Rua A, 70 – Jardim Vitória
USB	1133	↓	Gerência Distrital de Atenção à Saúde	Rua Lauro Jacques 20 - Floresta
USB	1228	↓	Instituto Superior De Ciências Da Saúde	Av. Barão Homem de Melo, 4324 – Estoril
USB	1372	↓	UMEI Belmonte	Rua Dom Silvério Gomes Pimenta, 375 - Belmonte
USB	1426	↓	UMEI Pindorama	Rua Guararapes, 1850 - Pindorama
USB	1464	↑	Universidade Castelo Branco	Rua Antônio Teixeira Dias, 2282 - Miramar

Legenda:

↑: base que entrou, com relação ao cenário 6-2

↓: base que saiu, com relação ao cenário 6-2

Fonte: Autora, 2017

Houve um ganho de 23%, 25% e 27% na taxa de cobertura total, em relação à cobertura atual, com a aquisição de uma, duas e três unidades de cada tipo, respectivamente.

Mesmo com a redução no tempo de resposta das USBs a cobertura aumentou, em média, 19%.

Como neste Cenário 6 todos os pontos eram suscetíveis a otimização, a cada etapa houve um remanejamento maior da localização das bases. As setas que aparecem ao lado das referências das bases nos cenários 5-2 e 5-3 indicam as mudanças com relação à etapa anterior: setas para cima indicam que a base é nova, ou seja, ela não existia no ano anterior. Setas para baixo indicam que uma base existente no ano anterior foi desativada e não faz mais parte da solução ótima.

Para 2019, além do acréscimo de duas bases, uma para cada tipo decorrente das novas aquisições planejadas para o ano, houve a realocação de uma USA e três USBs. Para 2020, foram remanejadas quatro USAs e cinco USBs, além dos dois novos pontos para alocação das novas unidades.

## 6.6 Simulação de cobertura

As soluções encontradas para os cenários 1 (atual) e 3 (otimizado), na seção anterior, foram utilizadas para o cálculo da cobertura das instâncias simuladas e detalhadas na [Seção 4.3](#). Os resultados são apresentados na [Tabela 21](#).

Tabela 21 – Cobertura das instâncias simuladas - Cenário 1 *versus* Cenário 3

Instância nº	Total de chamados	Cenário 1		Cenário 3		Incremento na cobertura
		Total cobertos	Taxa	Total cobertos	Taxa	
1	28908	16880	58.4%	24070	83.3%	24.9%
2	28575	16631	58.2%	23673	82.8%	24.6%
3	28775	16755	58.2%	23925	83.1%	24.9%
4	28959	16824	58.1%	24091	83.2%	25.1%
5	28943	16912	58.4%	24069	83.2%	24.7%
6	28743	16908	58.8%	23925	83.2%	24.4%
7	28750	16730	58.2%	23902	83.1%	24.9%
8	28413	16569	58.3%	23550	82.9%	24.6%
9	28854	16932	58.7%	23944	83.0%	24.3%
10	28916	17007	58.8%	24021	83.1%	24.3%
<b>Média</b>	<b>28784</b>	<b>16815</b>	<b>58,4%</b>	<b>23917</b>	<b>83.1%</b>	<b>25,6%</b>

Fonte: Autora, 2017

Como descrito na [Subseção 5.4.1](#), nas instâncias simuladas são considerados 128 bairros a mais do que no método exato. São bairros que não demandaram atendimento durante um período de 12 meses mas que foram considerados na simulação por serem regiões candidatas a empenhos futuros.

Com a inclusão dos 427 nós de demanda, a cobertura conseguida nas instâncias geradas ficou em média 11% menor se comparada à cobertura dos chamados históricos, seja na configuração de bases atual ou na otimizada. Dessa forma, a cobertura dos chamados com as facilidades instaladas nos pontos ótimos conforme solução dada pelo método exato permaneceu, em média, 25% maior do que a configuração atual de bases e ambulâncias.

A partir do comportamento similar entre as duas configurações mais distintas (configuração atual não otimizada e otimização com reconfiguração total das bases com 1.527 nós de facilidade) é possível inferir que o mesmo comportamento será encontrado nas configurações com otimização parcial, como nos cenários 2 e 5, ou que também possuem otimização total, como é o caso do cenário 6. A simulação não foi realizada para o cenário 4, uma vez que para o cálculo da taxa de ocupação são necessárias informações históricas e, portanto, só se aplica aos 299 bairros em que se conhece o número de atendimentos.

## 6.7 Abordagem multiobjetivo

Na abordagem multiobjetivo, dois objetivos conflitantes para a otimização da localização das ambulâncias foi considerado. Deseja-se maximizar o número de chamados cobertos e minimizar o número de bases instaladas. Para que fosse possível abordar o problema de forma ponderada, as funções foram normalizadas. A Equação (64) e a Equação (65) apresentam as funções formuladas para maximização da taxa de cobertura,  $TxCob$ , e da redução do número de bases,  $TxRedBases$ , respectivamente:

$$f_1(.) = TxCob = \frac{\sum_{i \in I} \sum_{u \in U} q_{iu} k_{iu}}{\sum_{i \in I} \sum_{u \in U} q_{iu}} \quad (64)$$

$$f_2(.) = TxRedBases = \frac{Q - \sum_{j \in J} z_j}{Q} \quad (65)$$

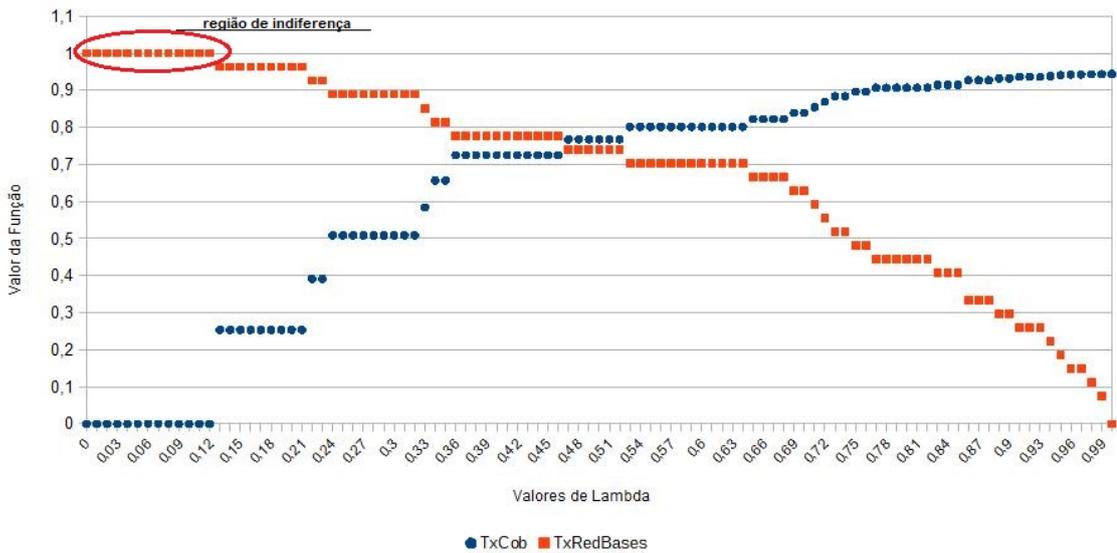
Foram realizadas 101 variações de pesos, de  $\lambda = 1$  a  $\lambda = 0$ , em intervalos de 0,01. Dessa forma foi possível buscar por um número maior de soluções para o conjunto de Pareto, que serão avaliadas pelo decisor após o processo de otimização, método denominado *a posteriori*. Por se tratar de um problema bi-objetivo, os pesos são definidos como  $\lambda$  e  $1 - \lambda$ .

A formulação da função objetivo utilizando o método das somas ponderadas para o problema multiobjetivo de localização das ambulâncias do SAMU-BH é apresentada na Equação (66). As restrições do modelo permaneceram as mesmas da abordagem mono-objetivo.

$$Max \ z = \lambda(TxCob) + (1 - \lambda)(TxRedBases) \quad (66)$$

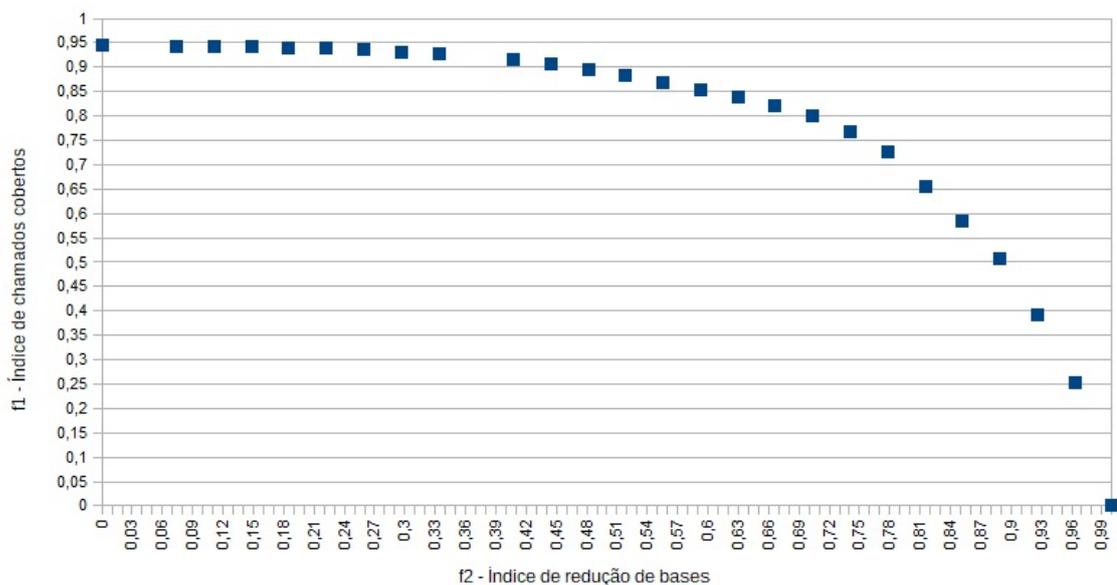
Os resultados foram obtidos em tempos computacionais satisfatórios com tempos de execução entre 42" e 63". A Figura 15 mostra o valor das funções para cada  $\lambda$  definido. Em alguns intervalos, a variação de pesos resultou em um mesmo valor das funções. No gráfico isso pode ser observado através dos platôs, chamados na abordagem multiobjetivo de regiões de indiferença. As 101 execuções geraram um conjunto de soluções com 26 pontos, ilustrados na Figura 16 e descritos na Tabela 22.

Figura 15 – Regiões de Indiferença na abordagem ponderada multiobjetivo.



Fonte: Autora, 2018

Figura 16 – Conjunto de Pareto



Fonte: Autora, 2018

Tabela 22 – Resultado - Conjunto de soluções para o problema ponderado multiobjetivo

$\lambda$	Valor da $f_1$	Valor da $f_2$	% cobertura	Bases instaladas
1	0,944	0	94,41%	27
0,99	0,944	0,074	94,37%	25
0,98	0,943	0,111	94,32%	24
0,97	0,942	0,148	94,23%	23
0,95	0,941	0,185	94,06%	22
0,94	0,938	0,222	93,84%	21
0,93	0,936	0,259	93,60%	20
0,9	0,932	0,296	93,20%	19
0,88	0,927	0,333	92,71%	18
0,85	0,915	0,407	91,47%	16
0,82	0,907	0,444	90,69%	15
0,76	0,896	0,481	89,58%	14
0,74	0,883	0,519	88,33%	13
0,72	0,869	0,556	86,91%	12
0,71	0,854	0,593	85,44%	11
0,7	0,839	0,630	83,89%	10
0,68	0,822	0,667	82,19%	9
0,64	0,801	0,704	80,13%	8
0,52	0,768	0,741	76,77%	7
0,46	0,725	0,778	72,52%	6
0,35	0,657	0,815	65,65%	5
0,33	0,584	0,852	58,44%	4
0,32	0,509	0,889	50,87%	3
0,23	0,391	0,926	39,13%	2
0,21	0,254	0,963	25,35%	1
0,12	0	1	0,00%	0

Fonte: Autora, 2018

Para análise, a solução resultante a partir de  $\lambda \leq 0,12$  até  $\lambda \leq 0$  foi desconsiderada, uma vez que a cobertura de nenhum chamado e a instalação de nenhuma base não faria sentido no caso prático. É possível perceber uma relação de não dominância entre todos os pontos. As 25 soluções que possuem índice de cobertura de chamados são soluções eficientes para o problema e não podem ser comparadas entre si ou ordenadas.

As bases ótimas obtidas em cada uma dessas soluções foram utilizadas como argumento de entrada para a simulação da cobertura em quatro das dez instâncias geradas e detalhadas na [Seção 4.3](#). As instâncias selecionadas estão descritas abaixo e foram escolhidas com base nos seguintes critérios:

- instância 08: possui o menor número de chamados;
- instância 04: possui o menor número de chamados;
- instâncias 03 e 09: possuem os valores medianos de chamados.

Os resultados são apresentados na [Tabela 23](#). Em todas as instâncias a redução do percentual de chamados foi similar, com reduções máximas por volta de 50% e reduções médias em torno de 6,6%. Em alguns casos, houve um pequeno aumento da taxa de cobertura a partir da diminuição no número de bases.

Tabela 23 – Resultado multiobjetivo para as instâncias simuladas

Pesos	Dados Históricos	Instância 03	Instância 04	Instância 08	Instância 09
$\lambda = 1$	94,41%	84,89%	84,90%	84,66%	84,67%
$\lambda = 0,99$	94,37%	84,64%	84,73%	84,29%	84,49%
$\lambda = 0,98$	94,32%	84,57%	84,66%	84,17%	84,38%
$\lambda = 0,97$	94,23%	84,60%	84,62%	84,27%	84,40%
$\lambda = 0,95$	94,06%	83,87%	83,91%	83,50%	83,60%
$\lambda = 0,94$	93,84%	84,39%	84,35%	84,18%	84,18%
$\lambda = 0,93$	93,60%	81,19%	80,93%	80,90%	80,64%
$\lambda = 0,9$	93,20%	80,40%	80,09%	79,97%	79,67%
$\lambda = 0,88$	92,71%	80,15%	79,67%	79,70%	79,48%
$\lambda = 0,85$	91,47%	76,61%	76,14%	76,12%	75,71%
$\lambda = 0,82$	90,69%	75,32%	74,76%	74,80%	74,50%
$\lambda = 0,76$	89,58%	74,72%	74,32%	74,32%	74,49%
$\lambda = 0,74$	88,33%	72,95%	72,69%	72,52%	72,62%
$\lambda = 0,72$	86,91%	71,53%	71,09%	70,99%	71,13%
$\lambda = 0,71$	85,44%	69,70%	69,26%	69,05%	69,46%
$\lambda = 0,7$	83,89%	67,39%	66,87%	66,29%	67,00%
$\lambda = 0,68$	82,19%	66,04%	65,55%	64,88%	65,55%
$\lambda = 0,64$	80,13%	63,33%	62,94%	62,46%	62,87%
$\lambda = 0,52$	76,77%	57,42%	57,00%	56,59%	56,86%
$\lambda = 0,46$	72,52%	53,05%	52,64%	52,41%	52,61%
$\lambda = 0,35$	65,65%	47,08%	46,67%	46,54%	46,57%
$\lambda = 0,33$	58,44%	41,79%	41,63%	41,65%	41,73%
$\lambda = 0,32$	50,87%	35,28%	35,12%	35,23%	35,13%
$\lambda = 0,23$	39,13%	26,33%	26,63%	26,47%	26,40%
$\lambda = 0,21$	25,35%	13,06%	12,94%	13,21%	13,35%
$\lambda = 0,12$	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%

Fonte: Autora, 2018

Conforme mencionada na [Seção 4.3](#), as instâncias foram criadas conforme distribuição de probabilidade dos chamados coletados. Elas refletem o comportamento histórico dos chamados mas também possuem um fator aleatório. Isso faz com que o resultado encontrado no método exato seja adequado também às instâncias, mas sem a garantia de ser a solução ótimo para todas elas.

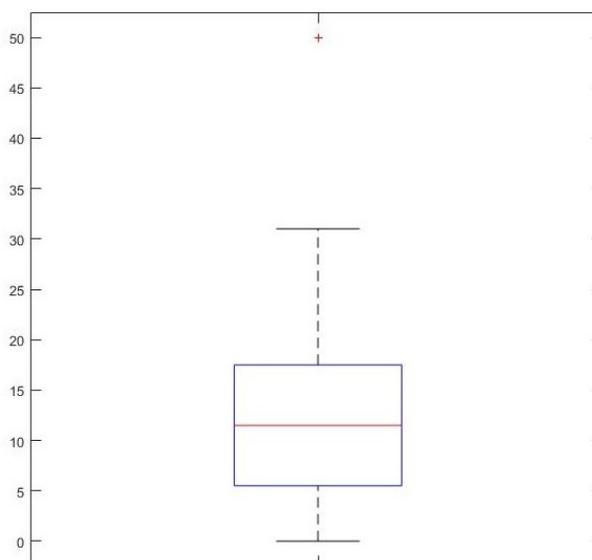
## 6.8 Análise e Discussão

O melhor resultado inteiro, com a função objetivo 25.242, foi encontrada na fase de pré-processamento. Foram realizados 146 cortes, em um tempo de processamento de 7,68 segundos. O melhor limite superior, 25.243,5125, foi encontrado após 1.411 iterações, com um *gap* de 0,01%. A solução é considerada satisfatória e obteve um erro de limite e de integralidade total na ordem de  $10^{-13}$  cada e um erro de limites de folga igual a zero.

Para todas as instâncias rodadas, o tempo médio de deslocamento entre uma base instalada e o nó de demanda foi de 7 minutos. Houve casos em que a base foi instalada muito próxima do ponto central do bairro e, com isso, o tempo computado foi de 0 minutos (tempo de deslocamento veicular menor que 1 minuto) e, no pior caso, o tempo de deslocamento foi de 50 minutos.

A Figura 17 mostra o boxplot da Instância 1, em que se percebe a distribuição dos tempos de resposta dos chamados. É possível identificar o limite inferior de 0 minutos, o superior de 31 minutos e, também, o *outlier*, que são os chamados que totalizaram 50 minutos. A linha mediana mostra uma distribuição simétrica dos dados.

Figura 17 – Boxplot dos tempos de resposta da Instância 01



Fonte: Autora, 2018

A solução otimizada distribuiu os pontos de localização das bases avançadas nas regiões mais ao Norte e mais ao Sul da cidade. Dessa forma, as regionais centrais, apesar de não possuírem bases, estão cercadas por, pelo menos, duas unidades em regiões de fronteira. A base localizada na regional do Barreiro foi a que sofreu a menor realocação. O novo ponto se encontra a menos de 900 metros de distância.

Na configuração atual das USBs, nota-se uma concentração de bases na região central da cidade. Metade delas está localizada em um raio de 5km a partir do Centro. A

otimização dispersou esses pontos, levando as bases mais para o sul do mapa. As regionais Barreiro e Oeste, que juntas representaram 22,5% de todo o atendimento registrado, receberam o maior número de pontos ótimos se comparado com o número de bases atualmente instaladas.

Na abordagem multiobjetivo foram encontradas 25 soluções eficientes que ponderam o número de chamados cobertos e a redução de bases necessárias para a cobertura dos chamados. Conforme as prioridades da gerência do SAMU-BH, cada solução poderá ser considerada mais adequada que outra. Entre os critérios que podem ser analisados, destacam-se:

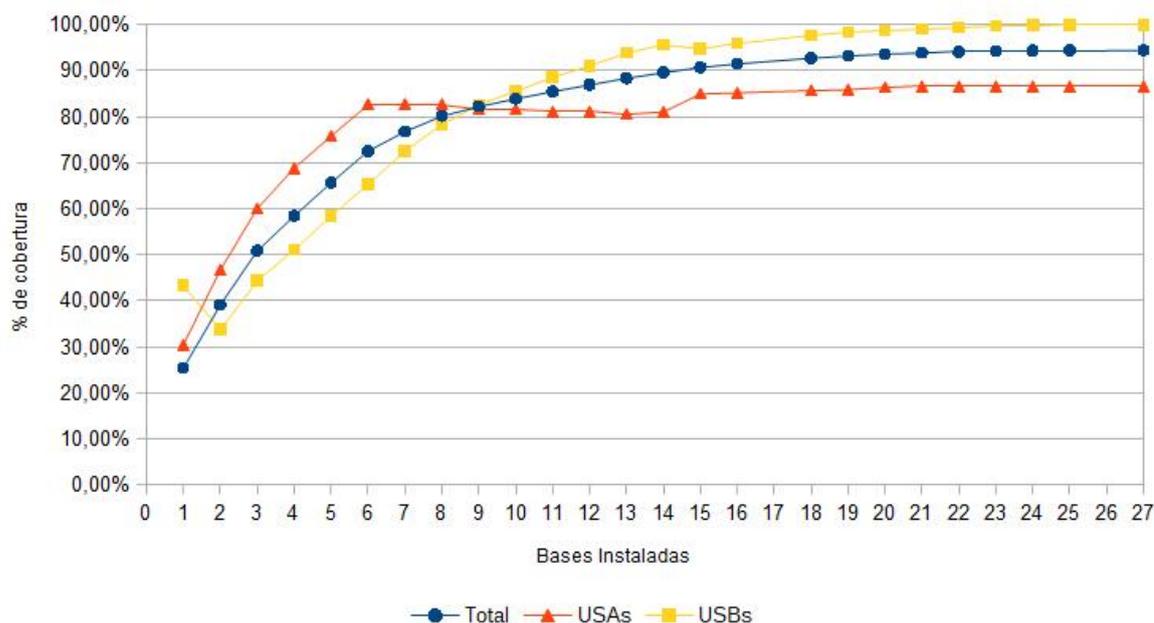
- variação do percentual de cobertura dos atendimentos avançados;
- variação do percentual de cobertura dos atendimentos básicos;
- variação do percentual de cobertura total;
- custos diretos e indiretos de instalação de uma base;
- número de nós cobertos;
- alocação de mais de uma unidade do mesmo tipo na mesma base conforme fila de espera em nós de maior demanda;

A [Figura 18](#) apresenta um gráfico que mostra a relação entre a taxa de cobertura dos chamados e o número de bases instaladas, referente aos resultados da abordagem multiobjetivo. É importante destacar que o objetivo do modelo atrelado à cobertura foi maximizar o total de chamados cobertos, ou seja, a soma de atendimentos realizados por USAs e USBs dentro dos tempos de resposta. Portanto, em alguns casos, o modelo pode priorizar a localização de uma unidade de um tipo ou de outro para incrementar a função objetivo o máximo possível.

A taxa de cobertura das USAs não se mostrou sensível à redução de até seis bases. Ou seja, para 27 ou 21 bases instaladas, a cobertura dos atendimentos com empenho de unidades avançadas permaneceria a mesma. Com relação à cobertura dos chamados com despacho de USBs, a instalação ótima de catorze unidades cobre a um número maior de chamados desse tipo (95,62%) do que a instalação ótima de quinze bases (94,76%). Como o objetivo é a maximização da cobertura total, os pontos ótimos de localização das bases seguem o critério de privilegiar os nós com maior volume de chamados, seja avançados ou básicos. A instalação de quinze bases resulta em uma cobertura de 24.248 chamados e suas localizações ótimas cobrem 14.833 chamados básicos. Em contrapartida, a instalação de catorze bases cobre a 14.968 chamados com empenho de USBs, mesmo com uma diminuição do número total de chamados cobertos, 8.982.

Ao analisar a cobertura total, percebe-se que a redução de 50% no número de bases reduz em apenas 5% a taxa de chamados cobertos. Isso se deve ao fato de que alguns bairros mais afastados geraram um número muito pequeno de chamados e para cobrir uma ou poucas ocorrências muitas vezes é necessária a instalação de uma base em um novo

Figura 18 – Taxas de Cobertura versus Bases Instaladas



Fonte: Autora, 2018

ponto. Como exemplo, a redução das duas primeiras bases, quando  $\lambda = 0,99$ , reduziu a cobertura em apenas 0,04% (11 chamados deixaram de ser cobertos).

Em contrapartida, como visto nos resultados do Cenário 04, para a cobertura integral de alguns nós é necessária a instalação de mais de uma ambulância do mesmo tipo, devido a taxa de indisponibilidade das unidades não comportar o volume da demanda. Para solucionar esses casos, é necessária a instalação de mais de uma unidade do mesmo tipo na mesma base. À medida que o número de bases diminui, um número menor de ambulâncias será alocada em pontos diferentes e as unidades remanescentes podem ser utilizadas para cobrir pontos que possuam maior pico de chamados. Por exemplo, quando são instaladas onze bases, as seis unidades avançadas continuam sendo alocadas e onze unidades básicas são atribuídas aos onze pontos. As dez unidades restantes, de um total de 21 USBs, podem ser realocadas conforme estudos sobre a fração de ocupação e fluxo de atendimento.

## 7 Conclusão

O Problema de Localização de Máxima Cobertura foi a referência utilizada para o desenvolvimento de soluções para alocação das bases e ambulâncias do SAMU-BH, objeto de estudo deste trabalho. Nesta abordagem, os recursos são limitados e o objetivo é maximizar a cobertura da demanda ao otimizar a localização das facilidades disponíveis para que elas consigam atender a um maior número de clientes.

Autores como [Toregas et al. \(1971\)](#), [Church e ReVelle \(1974\)](#), [Schilling et al. \(1979\)](#) apud [FIGUEIREDO; LORENA; CARVALHO, 2004](#)), [Schilling et al. \(1979\)](#) apud [BARRETO; ALEXANDRINO; COELHO, 2016](#)), [ReVelle e Hogan \(1989\)](#) apud [FARAHANI et al., 2012](#)), [ReVelle e Marianov \(1991\)](#), [Marianov e ReVelle \(1996\)](#), [Gendreau, Laporte e Semet \(1997\)](#), [Shmoys, Tardos e Aardal \(1997\)](#) desenvolveram importantes trabalhos na área e foram utilizados para embasar o criação do modelo matemático apresentado no [Capítulo 5](#).

Por se tratar de um estudo de caso, para que fosse possível a representação da realidade do SAMU-BH da forma mais fiel possível foram realizadas visitas à Central de Regulação localizada no bairro Coração Eucarístico e entrevistas com representantes da instituição. Foram coletadas, manualmente, dados secundários dos prontuários médicos dos pacientes atendidos pelas unidades móveis de Maio de 2016 a Abril de 2017, trabalho realizado durante 4 meses. Com o acesso a essas informações, um total de 29.048 atendimentos, foi possível medir estatisticamente o volume dos chamados e analisar a distribuição de probabilidades conforme o dia e horário do chamado, o tipo e a região da ocorrência, o destino do paciente e os tempos de resposta e atendimento dos empenhos realizados.

Um modelo de programação linear inteira foi desenvolvido com o objetivo de maximizar a cobertura dos atendimentos às ocorrências, baseado nos chamados históricos a que se teve acesso. A cidade foi dividida em 427 nós de demanda (de acordo com os bairros delimitados pela Prefeitura de Belo Horizonte) e a cada um deles foi atribuído um peso, referente ao volume de chamados originados da região. Foram mapeados 1.527 locais (comércios, sedes públicas, instituições de ensino, hospitais etc) que poderiam ser considerados candidatos a receber uma base do SAMU-BH. Os tempos de respostas entre as bases e a demanda foram calculados através do aplicativo *GoogleMapsAPI*.

As coberturas foram calculadas considerando seis cenários distintos. O modelo foi implementado em IBM ILOG CPLEX<sup>®</sup> 12.7.1, na sua configuração padrão, em um computador Dell Inspiron i14-5458-B40, com processador Intel Core i5 5200U de 2.2GHz, com 8GB de memória RAM, sistema operacional Windows. Os resultados encontrados foram satisfatórios. Em todos os testes realizados através do método exato, foram encontradas soluções ótimas e maximizaram a cobertura atual do serviço.

Foi possível aumentar de 9% a 25% a cobertura às ocorrências através da configuração ótima de localização das bases. No caso em que a otimização foi realizada em toda a frota existente, a estimativa de cobertura dos chamados atendidos por Unidades de Suporte Básico foi de 100%. Foram realizadas, também, simulações para aquisição de novas USAs e USBs no próximo triênio (2018-2020). As soluções mostram um aumento de 8% a 27% na taxa de cobertura aos chamados, variação resultante de alterações nos parâmetros utilizados.

Com base nos dados históricos coletados, foram geradas dez instâncias para simulação da cobertura, com os chamados distribuídos ao longo do ano de 2017. O total de chamados foi estimado através da Distribuição de Poisson e cada instância totalizou entre 28413 e 28959 ocorrências. A solução do método exato foi utilizada como dado de entrada do algoritmo, que calculava a base que atenderia cada chamado, se a ocorrência foi ou não coberta e qual foi o tempo de resposta estimado. Os resultados também mostraram um aumento de 25% na taxa de cobertura, se comparada à configuração atual.

A abordagem multiobjetivo para a maximização da taxa de cobertura dos chamados e da redução do número de ambulâncias instaladas mostrou-se passível de interessantes análises que serão realizadas *a posteriori* pelos decisores e gestores em saúde do SAMU-BH. Para solucionar o problema foi utilizado o método de soma ponderada e foram encontradas 25 soluções Pareto-Ótimas.

Os resultados computacionais atestam a aplicabilidade da Pesquisa Operacional como ferramenta de auxílio à gestão em serviços de saúde e abrem perspectivas e possibilidades de estudos para o setor. Os conhecimentos técnicos adquiridos em modelagem matemática e computacional foram utilizados para resolver um problema real do setor público sendo possível, assim, integrar teoria e prática e desenvolver um trabalho que possa contribuir efetivamente para uma prestação de serviço com mais qualidade e eficiência.

## 7.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, sugere-se a solução do problema através de um modelo contínuo, em que as demandas possam ser originadas de qualquer ponto do território, para ser comparada com a solução atual. Uma outra proposta é o desenvolvimento de um modelo de realocação de bases por turno de trabalho pois os períodos possuem características distintas e os pontos ótimos para cada um podem ser diferentes.

Recomenda-se também o desenvolvimento de uma metaheurística para o estudo de outras abordagens multiobjetivo do problema. A minimização da amplitude ou da variância dos tempos de resposta levará a um maior nivelamento do atendimento prestado para que toda a sociedade usufrua de um nível de serviço semelhante.

# Referências

- AGEEV, A. A. Improved approximation algorithms for multilevel facility location problems. **Operations Research Letters**, Elsevier, v. 30, n. 5, p. 327–332, 2002. Citado na página [24](#).
- AL-KHEDHAIRI, A. Simulated annealing metaheuristic for solving p-median problem. **Int. J. Contemp. Math. Sciences**, v. 3, n. 28, p. 1357–1365, 2008. Citado 2 vezes nas páginas [18](#) e [20](#).
- ALMEIDA, J. A. G. de; Barros Filho, M. B. B. de. Análise espacial das ocorrências atendidas pelo samu-jp através da utilização de banco de dados geográficos e sig. In: **VII Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto**. [S.l.]: UFS, 2014. p. 85–89. Citado na página [13](#).
- ALP, O.; ERKUT, E.; DREZNER, Z. An efficient genetic algorithm for the p-median problem. **Annals of Operations research**, Springer, v. 122, n. 1, p. 21–42, 2003. Citado 2 vezes nas páginas [18](#) e [20](#).
- ANDERSSON, T.; VÄRBRAND, P. Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. **Journal of the Operational Research Society**, Springer, v. 58, n. 2, p. 195–201, 2007. Citado na página [1](#).
- ANDRADE, L. A.; CUNHA, C. B. Modelo de apoio à decisão para um problema de posicionamento de bases, alocação e realocação de ambulâncias em centros urbanos: estudo de caso no município de São Paulo. **TRANSPORTES**, v. 22, n. 2, p. 34–50, 2014. Citado 2 vezes nas páginas [10](#) e [15](#).
- ARABANI, A. B.; FARAHANI, R. Z. Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 62, n. 1, p. 408–420, 2012. Citado 2 vezes nas páginas [25](#) e [26](#).
- AROSTEGUI, M. A.; KADIPASAOGLU, S. N.; KHUMAWALA, B. M. An empirical comparison of tabu search, simulated annealing, and genetic algorithms for facilities location problems. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 103, n. 2, p. 742–754, 2006. Citado na página [18](#).
- BACHOUCH, R. B.; GUINET, A.; HAJRI-GABOUJ, S. An integer linear model for hospital bed planning. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 140, n. 2, p. 833–843, 2012. Citado na página [1](#).
- BARON, O. et al. Ensuring feasibility in location problems with stochastic demands and congestion. **IIE transactions**, Taylor & Francis, v. 41, n. 5, p. 467–481, 2009. Citado na página [104](#).
- BARRETO, B.; ALEXANDRINO, F.; COELHO, O. Positioning of ambulances of the samu system by integer programming and queueing theory. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 23, n. 4, p. 828–841, 2016. Citado 4 vezes nas páginas [11](#), [15](#), [32](#) e [86](#).
- BAYKASOGLU, A.; DERELI, T.; SABUNCU, I. An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems. **Omega**, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 385–396, 2006. Citado 2 vezes nas páginas [19](#) e [20](#).

- BAZARAA, M. S.; GOODE, J. J. A cutting-plane algorithm for the quadratic set-covering problem. **Operations Research**, INFORMS, v. 23, n. 1, p. 150–158, 1975. Citado na página [102](#).
- BEASLEY, J. E. A note on solving large p-median problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 21, n. 2, p. 270–273, 1985. Citado 2 vezes nas páginas [16](#) e [20](#).
- BEAUDRY, A. et al. Dynamic transportation of patients in hospitals. **OR spectrum**, Springer, v. 32, n. 1, p. 77–107, 2010. Citado na página [1](#).
- BERALDI, P.; RUSZCZYŃSKI, A. The probabilistic set-covering problem. **Operations Research**, INFORMS, v. 50, n. 6, p. 956–967, 2002. Citado na página [103](#).
- BERMAN, O. The p maximal cover-p partial center problem on networks. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 72, n. 2, p. 432–442, 1994. Citado na página [107](#).
- BERMAN, O.; DREZNER, Z.; KRASS, D. Generalized coverage: New developments in covering location models. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 37, n. 10, p. 1675–1687, 2010. Citado na página [106](#).
- BERMAN, O.; KRASS, D. The generalized maximal covering location problem. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 29, n. 6, p. 563–581, 2002. Citado na página [106](#).
- BERMAN, O.; KRASS, D.; DREZNER, Z. The gradual covering decay location problem on a network. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 151, n. 3, p. 474–480, 2003. Citado na página [106](#).
- BERTSIMAS, D.; SIM, M. The price of robustness. **Operations research**, Informs, v. 52, n. 1, p. 35–53, 2004. Citado na página [11](#).
- BITENCOURT, M. A. P. **Componentes de um sistema computacional para análise de sistemas logísticos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2005. Citado na página [105](#).
- BÔAS, P. I. G. V. **Utilização de SIG na sistematização de ocorrências de trauma no SAMU-192 das cidades de Feira de Santana BA e Rio Claro SP**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Geografia). Citado na página [13](#).
- BOFFEY, B.; NARULA, S. C. Models for multi-path covering-routing problems. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 82, p. 331–342, 1998. Citado na página [103](#).
- BORGES, S. **Otimização Multiobjetivo Robusta Utilizando Modelos de Regressão e Sub-Problemas Lineares**. Abril 2017. 49 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. Citado na página [11](#).
- BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. [S.l.]: Senado, 1988. Citado na página [2](#).
- BRASIL. Regulamenta o atendimento das Urgências e Emergências. **Portaria 2.048**. [S.l.]: Ministério da Saúde, 2002. 63 p. Citado na página [3](#).
- BRASIL. Estabelece as atribuições das centrais de regulação médica de urgências e o dimensionamento técnico para a estruturação e operacionalização das Centrais SAMU-192. **Portaria 2.657**. [S.l.]: Ministério da Saúde, 2004. Citado na página [66](#).

- BROTCORNE, L.; LAPORTE, G.; SEMET, F. Ambulance location and relocation models. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 147, n. 3, p. 451–463, 2003. Citado na página 108.
- CAMARGO, R. S. de; JR, G. M.; LUNA, H. Benders decomposition for the uncapacitated multiple allocation hub location problem. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 1047–1064, 2008. Citado na página 9.
- CAPPANERA, P.; GALLO, G.; MAFFIOLI, F. Discrete facility location and routing of obnoxious activities. **Discrete Applied Mathematics**, Elsevier, v. 133, n. 1, p. 3–28, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 20.
- Carvalho Neto, J. F. de. **Otimização de rotas com o auxílio de uma plataforma SIG-T no serviço de atendimento móvel de urgência - SAMU João Pessoa-PB**. 190 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) — Universidade Federal da Paraíba, 2008. Citado na página 13.
- CHENCI, G. P.; RIGNEL, D. G.; LUCAS, C. A. Uma introdução á lógica fuzzy. **Revista Eletrônica de Sistemas de Informação e de Gestão Tecnológica**, v. 1, n. 1, 2011. Citado na página 104.
- CHIANG, C.-I.; HWANG, M.-J.; LIU, Y.-H. An alternative formulation for certain fuzzy set-covering problems. **Mathematical and Computer Modelling**, Elsevier, v. 42, n. 3-4, p. 363–365, 2005. Citado na página 104.
- CHIYOSHI, F.; GALVÃO, R. D.; MORABITO, R. O uso do modelo hipercubo na solução de problemas de localização probabilísticos. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 7, n. 2, p. 146–174, 2000. Citado na página 11.
- CHURCH, R.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. **Papers in regional science**, Wiley Online Library, v. 32, n. 1, p. 101–118, 1974. Citado 3 vezes nas páginas 16, 29 e 86.
- CHURCH, R. L. The planar maximal covering location problem. **Journal of Regional Science**, BLACKWELL PUBLISHERS 350 MAIN STREET, STE 6, CAMBRIDGE, MA 02148-5023, v. 24, n. 2, p. 185–201, 1984. Citado na página 105.
- CONTRERAS, I. A.; DÍAZ, J. A. Scatter search for the single source capacitated facility location problem. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 157, n. 1, p. 73–89, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- CRAINIC, T. G. et al. Cooperative parallel variable neighborhood search for the p-median. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 10, n. 3, p. 293–314, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- CURRENT, J. R.; SCHILLING, D. A. The median tour and maximal covering tour problems: Formulations and heuristics. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 73, n. 1, p. 114–126, 1994. Citado na página 106.
- CURRENT, J. R.; STORBECK, J. E. Capacitated covering models. **Environment and planning B: planning and Design**, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 15, n. 2, p. 153–163, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 102 e 105.

CURTIN, K. M.; HAYSLETT-MCCALL, K.; QIU, F. Determining optimal police patrol areas with maximal covering and backup covering location models. **Networks and Spatial Economics**, Springer, v. 10, n. 1, p. 125–145, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 106.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e Estatística para Engenharia e Ciências**. 6. ed. [S.l.]: Cengage Learning, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.

DUBKE, A. F.; FERREIRA, F. R. N.; PIZZOLATO, N. D. Plataformas logísticas: características e tendências para o brasil. In: **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. [S.l.]: ABEPRO, 2004. p. 841–848. Citado na página 26.

EISELT, H. A.; LAPORTE, G. Objectives in location problems. **Facility location: a survey of applications and methods**, Springer, 1995. Citado na página 23.

EMS World. **EMS Response Time Standards**. 2004. Disponível em: <<http://www.emsworld.com>>. Citado na página 6.

ERDEMIR, E. T. et al. Joint ground and air emergency medical services coverage models: A greedy heuristic solution approach. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 207, n. 2, p. 736–749, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 16, 20 e 104.

ERDEMIR, E. T. et al. Location coverage models with demand originating from nodes and paths: application to cellular network design. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 190, n. 3, p. 610–632, 2008. Citado na página 107.

FALLAH, H.; NAIMISADIGH, A.; ASLANZADEH, M. **Covering problem. Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies**. [S.l.]: Physica Verlag, Heidelberg, 2009. Citado na página 27.

FARAHANI, R. Z. et al. Covering problems in facility location: A review. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 62, n. 1, p. 368–407, 2012. Citado 10 vezes nas páginas 27, 28, 41, 86, 102, 103, 104, 105, 106 e 107.

FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR, M. **Facility Location: Concepts, models, algorithms and case studies**. 1. ed. [S.l.]: Physica-Verlag Heidelberg, 2009. Citado na página 23.

FIGUEIREDO, A. P. S.; LORENA, L. A.; CARVALHO, S. V. Localização de ambulâncias pelo modelo team–solução através do algoritmo genético construtivo. In: **IV Worcap–Workshop dos Cursos de Computação do INPE**. [S.l.: s.n.], 2004. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 86.

FIGUEIREDO, A. P. S.; LORENA, L. A. N. Localização de ambulâncias: Uma aplicação para a cidade de são josé dos campos–sp. In: **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. [S.l.]: INPE, 2005. p. 1965–72. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11 e 14.

FILIPPI, G. F. et al. Estudo sobre a localização de unidades básicas de saúde na cidade de sorocaba. In: **XXXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Anais do XXXII ENEGEP. Bento Gonçalves**. [S.l.]: ABEPRO, 2012. p. 01–14. Citado na página 9.

FITZSIMMONS, J. A. An emergency medical system simulation model. In: ACM. **Proceedings of the 5th conference on Winter simulation**. [S.l.], 1971. p. 18–25. Citado na página 7.

FRANCIS, R. L.; MCGINNIS, L. F.; WHITE, J. A. **Facility layout and location: an analytical approach**. [S.l.]: Pearson College Division, 1992. Citado na página 28.

GALVÃO, R. D.; ESPEJO, L. G. A.; BOFFEY, B. A comparison of lagrangean and surrogate relaxations for the maximal covering location problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 124, n. 2, p. 377–389, 2000. Citado na página 17.

GARCÍA-LÓPEZ, F. et al. The parallel variable neighborhood search for the p-median problem. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 8, n. 3, p. 375–388, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

GARCIA-LÓPEZ, F. et al. Parallelization of the scatter search for the p-median problem. **Parallel Computing**, Elsevier, v. 29, n. 5, p. 575–589, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

GARTNER, D.; KOLISCH, R. Scheduling the hospital-wide flow of elective patients. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 233, n. 3, p. 689–699, 2014. Citado na página 1.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F. The covering tour problem. **Operations Research**, INFORMS, v. 45, n. 4, p. 568–576, 1997. Citado 6 vezes nas páginas 16, 18, 20, 30, 86 e 103.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F. A dynamic model and parallel tabu search heuristic for real-time ambulance relocation. **Parallel computing**, Elsevier, v. 27, n. 12, p. 1641–1653, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa. **São Paulo**, v. 5, n. 61, p. 16–17, 2002. Citado na página 39.

GLOVER, F. Tabu search—part i. **ORSA Journal on computing**, INFORMS, v. 1, n. 3, p. 190–206, 1989. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

GLOVER, F. Tabu search—part ii. **ORSA Journal on computing**, INFORMS, v. 2, n. 1, p. 4–32, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

GOLDBERG, J. B. Operations research models for the deployment of emergency services vehicles. **EMS management Journal**, v. 1, n. 1, p. 20–39, 2004. Citado na página 63.

GONCHAROV, E.; KOCHETOV, Y. Probabilistic tabu search for the unconstrained discrete optimization problems. **Discrete Analysis and Operations Research**, v. 9, n. 2, p. 13–30, 2002. Citado na página 18.

GONG, Y.-J. et al. An efficient resource allocation scheme using particle swarm optimization. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, IEEE, v. 16, n. 6, p. 801–816, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

Google Maps APIs. **Documentação**. 2017. Disponível em: <<https://developers.google.com/maps/documentation/?hl=pt-br>>. Citado na página 46.

GOUDARD, B. et al. Localização da implantação de unidades básicas de saúde utilizando lógica fuzzy e sistemas de informação geográfica. 2014. Citado na página 13.

- GRANO, M. L. D.; MEDEIROS, D.; EITEL, D. Accommodating individual preferences in nurse scheduling via auctions and optimization. **Health Care Management Science**, Springer, v. 12, n. 3, p. 228, 2009. Citado na página 1.
- HAKIMI, S. L. Optimum distribution of switching centers in a communication network and some related graph theoretic problems. **Operations Research**, INFORMS, v. 13, n. 3, p. 462–475, 1965. Citado na página 27.
- HANSEN, P.; JAUMARD, B. Algorithms for the maximum satisfiability problem. **Computing**, Springer, v. 44, n. 4, p. 279–303, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- HANSEN, P.; KOCHETOV, Y.; MLADENOV, N. **Lower bounds for the uncapacitated facility location problem with user preferences**. [S.l.]: Groupe d'études et de recherche en analyse des décisions, HEC Montréal, 2004. Citado na página 9.
- HANSEN, P.; MLADENOVIC, N. Variable neighborhood search for the p-median. **Location Science**, Elsevier, v. 5, n. 4, p. 207–226, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 16, 18 e 20.
- HOEFER, M. Non-cooperative facility location and covering games. In: SPRINGER. **International Symposium on Algorithms and Computation**. [S.l.], 2006. p. 369–378. Citado na página 105.
- HOLMBERG, K. Exact solution methods for uncapacitated location problems with convex transportation costs. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 114, n. 1, p. 127–140, 1999. Citado na página 9.
- HOSAGE, C.; GOODCHILD, M. Discrete space location-allocation solutions from genetic algorithms. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 6, n. 2, p. 35–46, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- HWANG, H.-S. Design of supply-chain logistics system considering service level. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 43, n. 1, p. 283–297, 2002. Citado na página 104.
- HWANG, M.-J.; CHIANG, C.; LIU, Y. Solving a fuzzy set-covering problem. **Mathematical and computer modelling**, Elsevier, v. 40, n. 7-8, p. 861–865, 2004. Citado na página 104.
- IANNONI, A. P.; MORABITO, R. Modelo hipercubo integrado a um algoritmo genético para análise de sistemas médicos emergenciais em rodovias. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 13, n. 1, p. 93–104, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 11.
- INGOLE, P.; NICHAT, M. M. K. Landmark based shortest path detection by using dijkstra algorithm and haversine formula. **International Journal of Engineering Research and Applications**, v. 3, p. 162–165, 2013. Citado na página 45.
- JACOBSON, S. H. et al. Stockpile levels for pediatric vaccines: How much is enough? **Vaccine**, Elsevier, v. 24, n. 17, p. 3530–3537, 2006. Citado na página 1.
- JARAMILLO, J. H.; BHADURY, J.; BATT, R. On the use of genetic algorithms to solve location problems. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 29, n. 6, p. 761–779, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.

- JARDIM, R. X.; CONCEIÇÃO, S. V. Localização de unidades de resgate em Belo Horizonte. In: **XXXVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**. [S.l.]: SOBRAPO, 2004. p. 1771–1780. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [14](#).
- JIA, H.; ORDÓÑEZ, F.; DESSOUKY, M. M. Solution approaches for facility location of medical supplies for large-scale emergencies. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 52, n. 2, p. 257–276, 2007. Citado 3 vezes nas páginas [17](#), [20](#) e [107](#).
- JÚNIOR, G. P. **Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto**. Março 2011. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2011. Citado 2 vezes nas páginas [35](#) e [36](#).
- JUNIOR, L. C. N. Um estudo para redução do tempo de resposta do SAMU de Belo Horizonte através da realocação das bases de operação. UFMG, 2011. Citado 2 vezes nas páginas [12](#) e [15](#).
- KLINCEWICZ, J. G. Avoiding local optima in the p-hub location problem using tabu search and grasp. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 40, n. 1, p. 283–302, 1992. Citado 2 vezes nas páginas [19](#) e [20](#).
- KLOSE, A.; DREXL, A. Facility location models for distribution system design. v. 162, p. 4–29, 2005. Citado na página [22](#).
- KORNBLUTH, J. S. H. Duality, indifference and sensitivity analysis in multiple objective linear programming. **Journal of the Operational Research Society**, Springer, v. 25, n. 4, p. 599–614, 1974. Citado na página [38](#).
- KOSKO, B. Neural networks and fuzzy systems: a dynamical systems approach to machine intelligence/book and disk. **Vol. 1 Prentice hall**, 1992. Citado na página [13](#).
- KRARUP, J.; PISINGER, D.; PLASTRIA, F. Discrete location problems with push–pull objectives. **Discrete Applied Mathematics**, Elsevier, v. 123, n. 1, p. 363–378, 2002. Citado na página [23](#).
- LABBÉ, M.; THISSE, J.-F.; WENDELL, R. E. Sensitivity analysis in minimum facility location problems. **Operations Research**, INFORMS, v. 39, n. 6, p. 961–969, 1991. Citado na página [22](#).
- LARSON, R. C. A hypercube queuing model for facility location and redistricting in urban emergency services. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 1, n. 1, p. 67–95, 1974. Citado na página [12](#).
- LEVANOVA, T. V.; LORESH, M. Algorithms of ant system and simulated annealing for the p-median problem. **Automation and Remote Control**, Springer, v. 65, n. 3, p. 431–438, 2004. Citado 2 vezes nas páginas [18](#) e [20](#).
- LI, S.; SVENSSON, O. Approximating k-median via pseudo-approximation. **SIAM Journal on Computing**, SIAM, v. 45, n. 2, p. 530–547, 2016. Citado na página [9](#).
- LIU, Y.-H. A heuristic algorithm for the multi-criteria set-covering problems. **Applied mathematics letters**, Elsevier, v. 6, n. 5, p. 21–23, 1993. Citado na página [105](#).

- LOBATO, F. S. **Otimização multi-objetivo para o projeto de sistemas de engenharia**. Setembro 2008. 402 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal de Uberlândia, 2008. Citado na página 35.
- LOBIANCO, A.; ANGULO-MEZA, L. Uma comparação de métodos de solução para problemas de programação linear multiobjetivo. **SIMPÓSIO DE PESQUISA OPERACIONAL E LOGÍSTICA DA MARINHA-SPOLM**, v. 10, p. 1–14, 2007. Citado na página 38.
- LOVE, R. F.; MORRIS, J. G.; WESOLOWSKY, G. O. Facilities location. **Chapter**, v. 3, p. 51–60, 1988. Citado 2 vezes nas páginas 102 e 105.
- LUQUE, L. **Análise da aglutinação de estados em cadeias de markov do modelo hipercubo de filas com servidores co-localizados**. 2006. Tese (Doutorado) — Dissertação (Mestrado)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Citado na página 11.
- MANDELL, M. B. Covering models for two-tiered emergency medical services systems. **Location Science**, Elsevier, v. 6, n. 1, p. 355–368, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 113.
- MAPA, S.; LIMA, R. Sistemas de informação geográfica (sig) como ferramenta suporte a estudos de localização e roteirização. **XII SIMPEP**, 2005. Citado na página 13.
- MARIANOV, V.; REVELLE, C. The queueing maximal availability location problem: a model for the siting of emergency vehicles. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 93, n. 1, p. 110–120, 1996. Citado 4 vezes nas páginas 16, 86, 110 e 111.
- MARQUES, R. R. **Aplicação de uma abordagem robusta no problema de localização de ambulâncias com estudo de caso na cidade de Catalão-Goiás**. Agosto 2016. 119 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) — Universidade Federal de Goiás, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 15.
- MARQUES, R. R.; QUEIROZ, T. Estudo de um modelo de programação inteira para o problema de localização de estações e ambulâncias. In: **Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria, Caldas Novas. Anais do Congresso Nacional de Matemática Aplicada à Indústria**. São Paulo: Editora Edgard Blücher. [S.l.: s.n.], 2014. p. 410–420. Citado na página 9.
- MCCORMACK, R.; COATES, G. A simulation model to enable the optimization of ambulance fleet allocation and base station location for increased patient survival. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 247, n. 1, p. 294–309, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- MCKENDALL, A. R.; SHANG, J.; KUPPUSAMY, S. Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem. **Computers & operations research**, Elsevier, v. 33, n. 8, p. 2431–2444, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- MELKOTE, S.; DASKIN, M. S. Capacitated facility location/network design problems. Elsevier, v. 129, n. 3, p. 481–495, 2001. Citado na página 24.
- MENDONÇA, F. C.; MORABITO, R. Aplicação do modelo hipercubo para análise de um sistema médico-emergencial em rodovia. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 7, n. 1, p. 73–91, 2000. Citado na página 11.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Orientações técnicas para o planejamento arquitetônico de uma central de regulação das urgências - SAMU 192**. [S.l.], 2014. 09 p. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 64.

MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Cobertura e Centrais de Regulação das Urgências**. 2017. Disponível em: <<http://sage.saude.gov.br/>>. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 3.

MISEVIČIUS, A. A modified simulated annealing algorithm for the quadratic assignment problem. **Informatica**, Institute of Mathematics and Informatics, v. 14, n. 4, p. 497–514, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

MLADENOVIĆ, N. et al. The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 179, n. 3, p. 927–939, 2007. Citado na página 18.

MLADENOVIĆ, N.; LABBÉ, M.; HANSEN, P. Solving the p-center problem with tabu search and variable neighborhood search. **Networks**, Wiley Online Library, v. 42, n. 1, p. 48–64, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e Probabilidade para Engenheiros**. 4. ed. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.

MORAIS, D. A. **Parada cardiorespiratória em ambiente pré hospitalar: Ocorrências Atendidas Pelo Serviço de Atendimento Móvel de Urgência de Belo Horizonte**. Junho 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Enfermagem – Saúde e Enfermagem) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. Citado na página 7.

MORETTIN, L. G. **Estatística Básica: probabilidade e inferência**. 1. ed. [S.l.]: Pearson, 2010. Citado na página 33.

MURRAY, A. T.; CHURCH, R. L. Applying simulated annealing to location-planning models. **Journal of Heuristics**, Springer, v. 2, n. 1, p. 31–53, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

MURRAY, A. T.; TONG, D.; KIM, K. Enhancing classic coverage location models. **International Regional Science Review**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 33, n. 2, p. 115–133, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 102 e 105.

OGRYCZAK, W. On the lexicographic minimax approach to location problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 100, n. 3, p. 566–585, 1997. Citado na página 22.

O'HANLEY, J. R.; CHURCH, R. L. Designing robust coverage networks to hedge against worst-case facility losses. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 209, n. 1, p. 23–36, 2011. Citado na página 105.

OLIVEIRA, É. A. de. Otimização da localização das bases de operação do serviço de atendimento móvel de urgência: Samu. **Caminhos de Geografia**, v. 9, n. 26, 2008. Citado na página 13.

OWEN, S. H.; DASKIN, M. S. Strategic facility location: A review. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 111, n. 3, p. 423–447, 1998. Citado na página 25.

- PAIVA, M. H. R. S. **Atendimento pré-hospitalar público de Belo Horizonte: uma análise da adoção às medidas de precaução pela equipe multiprofissional**. Fevereiro 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Enfermagem) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. Citado na página 6.
- PAPOULIS, A. **Probability, Random Variables, and Stochastic Processes**. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill International Editions, 1991. Citado na página 35.
- PASANDIDEH, S. H. R.; NIAKI, S. T. A. Genetic application in a facility location problem with random demand within queuing framework. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Springer, v. 23, n. 3, p. 651–659, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- PEREIRA, A. P. d. J. T. et al. Modelo de suporte à tomada de decisão sobre de acidentes de trânsito com vítimas baseado em lógica fuzzy. Universidade Federal da Paraíba, 2013. Citado na página 13.
- PEREZ, J. M.; GARCIA, J. R.; MORENO, M. A parallel genetic algorithm for the discrete p-median problem. **Studies in Locational Analysis**, v. 7, p. 131–141, 1994. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- PÉREZ, M. A. F. **Um método heurístico para o problema de escalonamento multiobjetivo em vários ambientes de máquinas**. Março 2012. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, 2012. Citado na página 37.
- PERSSON, M.; PERSSON, J. A. Health economic modeling to support surgery management at a swedish hospital. **Omega**, Elsevier, v. 37, n. 4, p. 853–863, 2009. Citado na página 1.
- PIZZOLATO, N. D. Problemas de localização. **Notas de aula, Mestrado Profissionalizante em Logística - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio**, 2003. Citado na página 105.
- PRADO, D. F. M. **Busca Tabu aplicada ao problema de localização de facilidades com restrição de capacidade e fonte única**. Agosto 2007. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — UNICAMP, 2007. Citado na página 10.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Estatísticas e Indicadores**. 2011. Disponível em: <<http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&app=estatisticaseindicadores&pg=7742&tax=20040>>. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 63.
- PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE. **Encontre a sua regional**. 2014. Disponível em: <[http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pldPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=pbh&tax=54318&lang=pt\\_br&pg=5120&taxp=0&](http://portalpbh.pbh.gov.br/pbh/ecp/comunidade.do?evento=portlet&pldPlc=ecpTaxonomiaMenuPortal&app=pbh&tax=54318&lang=pt_br&pg=5120&taxp=0&)>. Citado 2 vezes nas páginas 56 e 63.
- PRIYAN, S. Operations research in healthcare: A review. v. 1, n. 3, p. 01–07, 2017. Citado na página 1.
- QIN, J.; NI, L.-I.; SHI, F. Combined simulated annealing algorithm for the discrete facility location problem. **The Scientific World Journal**, Hindawi Publishing Corporation, v. 2012, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- RESENDE, M. G.; WERNECK, R. F. A hybrid heuristic for the p-median problem. **Journal of heuristics**, Springer, v. 10, n. 1, p. 59–88, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

- REVELLE, C.; HOGAN, K. The maximum availability location problem. **Transportation Science**, INFORMS, v. 23, n. 3, p. 192–200, 1989. Citado 4 vezes nas páginas 40, 41, 86 e 107.
- REVELLE, C.; HOGAN, K. The maximum reliability location problem and  $\alpha$ -reliablep-center problem: Derivatives of the probabilistic location set covering problem. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 18, n. 1, p. 155–173, 1989. Citado 3 vezes nas páginas 16, 103 e 107.
- REVELLE, C.; MARIANOV, V. A probabilistic fleet model with individual vehicle reliability requirements. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 53, n. 1, p. 93–105, 1991. Citado 3 vezes nas páginas 16, 86 e 108.
- REVELLE, C.; SCHOLSSBERG, M.; WILLIAMS, J. Solving the maximal covering location problem with heuristic concentration. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 35, n. 2, p. 427–435, 2008. Citado na página 16.
- REVELLE, C. S.; EISELT, H. A. Location analysis: A synthesis and survey. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 165, n. 1, p. 1–19, 2005. Citado na página 16.
- REVELLE, C. S.; LAPORTE, G. The plant location problem: new models and research prospects. **Operations Research**, INFORMS, v. 44, n. 6, p. 864–874, 1996. Citado na página 24.
- RIBAS, A. T. **Importância do APH rápido e eficiente no trauma automobilístico**. 2011. Disponível em: <<https://biblioteca.cbm.sc.gov.br/biblioteca>>. Citado na página 6.
- ROHLEDER, T. R. et al. Using simulation modeling to improve patient flow at an outpatient orthopedic clinic. **Health care management science**, Springer, v. 14, n. 2, p. 135–145, 2011. Citado na página 1.
- ROLLAND, E.; SCHILLING, D. A.; CURRENT, J. R. An efficient tabu search procedure for the p-median problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 96, n. 2, p. 329–342, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- SADIGH, A. N.; MOZAFARI, M.; KASHAN, A. H. A mixed integer linear program and tabu search approach for the complementary edge covering problem. **Advances in Engineering Software**, Elsevier, v. 41, n. 5, p. 762–768, 2010. Citado na página 107.
- SALHI, S. Defining tabu list size and aspiration criterion within tabu search methods. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 67–86, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.
- SASAKI, S. et al. Using genetic algorithms to optimise current and future health planning-the example of ambulance locations. **International journal of health geographics**, BioMed Central, v. 9, n. 1, p. 4, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- SAXENA, A.; GOYAL, V.; LEJEUNE, M. A. Mip reformulations of the probabilistic set covering problem. **Mathematical programming**, Springer, v. 121, n. 1, p. 1–31, 2010. Citado na página 103.
- SCHILLING, D. et al. The team/fleet models for simultaneous facility and equipment siting. **Transportation Science**, INFORMS, v. 13, n. 2, p. 163–175, 1979. Citado 4 vezes nas páginas 16, 31, 32 e 86.

SCHMID, V.; DOERNER, K. F. Ambulance location and relocation problems with time-dependent travel times. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 207, n. 3, p. 1293–1303, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

SECRETARIA DE ATENÇÃO À SAÚDE. DEPARTAMENTO DE ATENÇÃO ESPECIALIZADA. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Regulação médica das urgências**. [S.l.], 2006. 126 p. Citado na página 3.

SHARIFF, S. R.; MOIN, N. H.; OMAR, M. Location allocation modeling for healthcare facility planning in malaysia. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 62, n. 4, p. 1000–1010, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.

SHMOYS, D. B.; TARDOS, É.; AARDAL, K. Approximation algorithms for facility location problems. In: ACM. **Proceedings of the twenty-ninth annual ACM symposium on Theory of computing**. [S.l.], 1997. p. 265–274. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 86.

SILVA, E. L. d.; MENEZES, E. M. Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação. 3. ed. rev. atual, 2001. Citado na página 39.

SILVA, P. M. S. **Análise do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) de Belo Horizonte via simulação e otimização**. 2010. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção – Produção e Logística) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Citado 4 vezes nas páginas 4, 7, 12 e 14.

SOUZA, R. M. d. et al. Extensão do modelo hipercubo para análise de sistemas de atendimento médico emergencial com prioridade na fila. **Production**, SciELO Brasil, v. 24, n. 1, p. 1–12, 2014. Citado na página 11.

SOUZA, R. M. d. et al. Análise da configuração do SAMU utilizando modelo hipercubo com prioridade na fila e múltiplas alternativas de localização de ambulâncias. Universidade Federal de São Carlos, 2010. Citado na página 11.

SOUZA, R. M. de. **Análise da configuração do SAMU utilizando modelo hipercubo com probabilidade na fila e múltiplas alternativas de localização de ambulâncias**. 221 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) — Universidade Federal de São Carlos, 2010. Citado na página 14.

TAKAHASHI, R. H. C. Otimização escalar e vetorial. **Notas de aula - Departamento de Matemática - UFMG**, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 38.

TAKEDA, R. A.; WIDMER, J. A.; MORABITO, R. Aplicação do modelo hipercubo de filas para avaliar a descentralização de ambulâncias em um sistema urbano de atendimento médico de urgência. **Pesquisa Operacional**, SciELO Brasil, v. 24, n. 1, p. 39–71, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 11.

TALBI, E.-G. et al. Parallel ant colonies for the quadratic assignment problem. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier, v. 17, n. 4, p. 441–449, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

TOREGAS, C. et al. The location of emergency service facilities. **Operations research**, *Inform*, v. 19, n. 6, p. 1363–1373, 1971. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 86.

TRAGANTALERNGSAK, S.; HOLT, J.; RÖNNQVIST, M. An exact method for the two-echelon, single-source, capacitated facility location problem. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 123, n. 3, p. 473–489, 2000. Citado na página 9.

TSUCHIYA, K.; BHARITKAR, S.; TAKEFUJI, Y. A neural network approach to facility layout problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 89, n. 3, p. 556–563, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

UNO, T.; KATAGIRI, H.; KATO, K. A fuzzy model for the multiobjective emergency facility location problem with a-distance. **Open Cybernetics & Systemics Journal**, Bentham Science Publishers B. V., P. O. Box 1673 Hilversum 1200 BR Netherlands, v. 1, p. 21–27, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

VASKO, F. J.; WILSON, G. R. Hybrid heuristics for minimum cardinality set covering problems. **Naval Research Logistics (NRL)**, Wiley Online Library, v. 33, n. 2, p. 241–249, 1986. Citado na página 28.

VERAO, P. **Abordagem à vítima de trauma na fase pré-hospitalar: Avaliação do papel das equipas de bombeiros**. Junho 2013. 41 f. Dissertação (Mestrado em Medicina) — Universidade da Beira Interior, 2013. Citado na página 6.

VOSS, S. A reverse elimination approach for the p-median problem. **Studies in Locational Analysis**, v. 8, p. 49–58, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 20.

WAGNER, J.; FALKSON, L. The optimal nodal location of public facilities with price-sensitive demand. **Geographical Analysis**, Wiley Online Library, v. 7, n. 1, p. 69–83, 1975. Citado na página 25.

WU, X.; ZHU, Y. An optimization method for importance factors and beam weights based on genetic algorithms for radiotherapy treatment planning. **Physics in Medicine & Biology**, IOP Publishing, v. 46, n. 4, p. 1085, 2001. Citado na página 1.

YAPICIOGLU, H.; SMITH, A. E.; DOZIER, G. Solving the semi-desirable facility location problem using bi-objective particle swarm. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 177, n. 2, p. 733–749, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.

ZANINI, J.; NASCIMENTO, E. R. P. do; BARRA, D. C. C. Parada e reanimação cardiorrespiratória: Conhecimentos da equipe de enfermagem em unidade de terapia intensiva. v. 18, n. 2, p. 143–147, 2006. Citado na página 7.

ZHAN, H. et al. Retrieval of water optical properties for optically deep waters using genetic algorithms. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, IEEE, v. 41, n. 5, p. 1123–1128, 2003. Citado na página 17.

# Apêndices

# APÊNDICE A – Extensões dos modelos SCP e MCLP

A necessidade de modelar de forma mais fiel a realidade do problema estudado contribuiu para o desenvolvimento de novas abordagens aos modelos *set covering* e *maximal covering*. Existem na literatura diversos estudos que utilizaram de derivações dos modelos clássicos para que fosse possível representar características específicas de dado cenário (FARAHANI et al., 2012).

São extensões do SCP:

- *Location Set Covering Problem - LSCP*: dividido em modelos implícitos e explícitos. No modelo implícito cada região pode ser coberta por uma ou mais facilidades. Ou seja, existirão níveis de cobertura e cada facilidade cobrirá um percentual da demanda. No explícito, cada área de demanda será coberta por uma combinação predefinida de facilidades, que proporcionará a cada região a cobertura completa desejada (MURRAY; TONG; KIM, 2010 apud FARAHANI et al., 2012).
- *Capacitated SCP*: em grande parte dos modelos de cobertura a capacidade das facilidades é desconsiderada. A minimização dos custos se dá, basicamente, envolvendo custos de instalação e de penalizações. Ou seja, a demanda é considerada coberta se existe uma facilidade instalada capaz de supri-lá dentro do tempo ou distância preestabelecidos, e não leva em conta que as facilidades possam ter capacidade limitada e, em algum momento, não conseguir atender a toda demanda atribuída a ela. Alguns autores, como Current e Storbeck (1988 apud FARAHANI et al., 2012) apresentam essa versão capacitada.
- *Quadratics SCP*: semelhante ao citado na Seção 3.1 dentro das classificações de modelos *Pull*. Enquanto outros modelos trabalham com o custo de instalação de nova facilidade,  $C \cdot X$ , Bazaraa e Goode (1975 apud FARAHANI et al., 2012) apresentaram uma função objetivo que leva em consideração o custo da relação entre dois pares de facilidades,  $X^T \cdot C \cdot X$ .
- *Multiple optimal SCP*: conhecendo o número ótimo de facilidades necessárias para fazer a cobertura definida e partindo do princípio em que há múltiplas soluções para o problema, o problema chamado por Love, Morris e Wesolowsky (1988 apud FARAHANI et al., 2012) de *set covering under the minimax criterion* tem como objetivo encontrar os melhores pontos segundo critérios definidos pelo tomador de decisão como, por exemplo, minimizar o tempo máximo de todos os pontos da demanda à facilidade mais próxima.

- *Covering Tour Problem* (CTP): formulação de programação linear inteira a partir de um grafo desenvolvido por [Gendreau, Laporte e Semet \(1997 apud FARAHANI et al., 2012\)](#), determina o menor ciclo Hamiltoniano a partir de um conjunto  $V$  de todos os vértices para que todo o subconjunto coberto  $W \subseteq V$  esteja dentro de uma distância predeterminada do ciclo. Aplicado para o planejamento de rotas de vigilância e no sistema de transportes.
- *Path Covering Problems*: em *Maximum Population Shortest Path - MPSP* encontra-se um caminho na rede que tenha a menor distância com a maior cobertura populacional. Em *2-MPSP* dois caminhos são encontrados para que, combinados, minimizem a distância com a maximização da população coberta em pelo menos um deles. Utilizado em problemas de transportes envolvendo trens e metrô, por exemplo ([BOFFEY; NARULA, 1998 apud FARAHANI et al., 2012](#)).
- *Probabilistic SCP*: considera parâmetros determinísticos de *SCP* como probabilísticos, levando em conta aspectos dinâmicos do problema, principalmente em facilidades que envolvam serviços de emergência, onde, em alguns casos, a ambulância, por exemplo, não está disponível para atender ao chamado. Para esses casos, [Revelle e Hogan \(1989 apud FARAHANI et al., 2012\)](#) desenvolveram uma nova restrição, 67, considerando a função objetivo 6. Dada uma taxa de probabilidade  $\alpha$ , um acumulado  $F_i$  de chamados por hora no nó  $i$  multiplicado pela média de duração das ligações  $h$  e o menor inteiro que satisfaça a inequação  $1 - (\frac{F_i}{b_i})^{b_i} \geq \alpha$ . Seja  $x_j$  a variável de decisão que indica se a facilidade será instalada do ponto  $j$  ou não, conforme a restrição 8. Em uma primeira vertente, chamada de  *$\alpha$ -reliable P-center problem* o objetivo é minimizar o tempo máximo para a disponibilização do serviço dentro de um intervalo de confiança. Na segunda vertente, *the maximum reliability location problem* deseja-se encontrar os locais que maximizem o intervalo mínimo de confiança do serviço.

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq b_i, \quad \forall i, \quad (67)$$

Outro modelo, apresentado por [Beraldi e Ruszczyński \(2002 apud FARAHANI et al., 2012\)](#) substitui a restrição (67) pela (68), onde garante que a cobertura deve ser atendida dentro de uma certa probabilidade.

$$P\{Ax \geq \zeta\} \geq p \quad (68)$$

Sendo  $A$  uma matriz de cobertura onde o elemento  $ij = 1$  se a facilidade instalada no ponto  $j$  cobre a demanda  $i$ ,  $\zeta$  um vetor binário randômico e  $p \in (0,1)$  o intervalo de confiança. [Saxena, Goyal e Lejeune \(2010 apud FARAHANI et al., 2012\)](#) propuseram três formulações do modelo de programação inteira mista para o *SCP*, onde foi possível substituir a restrição (68) por duas outras restrições.

- *Stochastic SCP*: Hwang (2002 apud FARAHANI et al., 2012) apresentou resultados para um problema envolvendo localização de facilidades e roteamento de veículos. Na primeira etapa, o objetivo foi definir um número mínimo de depósitos assumindo que a probabilidade  $p$  de cada ponto de demanda ser coberto deveria ser maior ou igual a um valor crítico  $r_i$ . O modelo é uma extensão da versão determinística em um espaço estocástico considerando uma probabilidade definida pelo parâmetro  $a_{ij}$ , binário. Dado um nível de serviço requerido,  $A_i$ , e um custo  $c_{ij}$  de transporte entre nós, a variável  $a_{ij}$  assume valor 1 se  $p(c_{ij} \leq A_i) \geq r_i$ . Nele, as facilidades podem ser consideradas sempre disponíveis ou não. Baron et al. (2009 apud FARAHANI et al., 2012) também desenvolveram um modelo estocástico, considerando o nível de disponibilidade da facilidade, aplicado a serviços de emergência. O objetivo é minimizar o número total de facilidades, considerando uma rede não direcionada, sob a restrição de manter a disponibilidade do serviço em cada nó  $i$  dentro de um intervalo  $\alpha$  estipulado.
- *Fuzzy SCP*: utilizando conceitos da Lógica Fuzzy, no estudo de Hwang, Chiang e Liu (2004 apud FARAHANI et al., 2012) e posteriormente Chiang, Hwang e Liu (2005 apud FARAHANI et al., 2012) foram desenvolvidos modelos que consideraram as incertezas existentes no clássico modelo SCP. O objetivo é encontrar uma  $\alpha$ -cobertura ótima para um dado conjunto  $N_i$  e um grau  $\alpha$  de cobertura fuzzy desejado. Uma introdução aos conceitos da Lógica Fuzzy pode ser encontrada em Chenci, Rignel e Lucas (2011).
- *Multiple Coverage SCP*: considera diversos tipos de facilidades e cada demanda deverá ser coberta por uma determinada quantidade, dependendo do tipo. Tem como restrição o número máximo de facilidades que devem ser alocadas.
- *Backup Coverage SCPs*: em seu modelo, focado no transporte médico de urgência em casos de acidente automobilístico, Erdemir et al. (2010) definiram como cobertura a combinação entre tempo de resposta (tempo de chegada ao local do acidente) e tempo total do serviço (ou seja, até a chegada ao hospital). Foram considerados três tipos: a cobertura terrestre, a cobertura aérea e a junção de ambas nos casos em que os dois são necessários para um mesmo chamado (transporte via ambulância do local da ocorrência até a base aérea e via helicóptero, da base até o hospital, por exemplo). Devido à incerteza associada à localização exata da colisão o modelo contempla cobrir não só o nó da demanda mas todo o seu caminho. Também considera a possível indisponibilidade do serviço médico de emergência no solo, e modela uma cobertura de *backup*, realizada por outro transporte terrestre ou um aéreo. A função objetivo minimiza o número de facilidades alocadas e tenta evitar a sobreposição de cobertura. O modelo obedece aos seguintes critérios: todos os nós/caminhos da demanda estarão cobertos por, pelo menos, um transporte aéreo, dois terrestres ou uma combinação desses, e todos os serviços médicos de emergência devem estar

alocados de forma que seja possível fazer a cobertura conjunta (aéreo + terrestre).

- *Multi-Criteria SCP (MCSC)*: uma abordagem multicritério para *SCP*. O problema assume a existência de vários atributos e, para cada atributo, uma cobertura específica. Um ponto será coberto se houver cobertura por parte de todos os atributos existentes com o objetivo de minimizar o custo de cada um deles (LIU, 1993 apud FARAHANI et al., 2012).
- *Covering Games*: baseado na Teoria dos Jogos, Hoefler (2006 apud FARAHANI et al., 2012) consideraram o problema de cobertura como um jogo não cooperativo, sendo que cada facilidade que esteja habilitada a cobrir uma demanda existente é um jogador. O objetivo é minimizar o custo total das unidades adquiridas, assegurando a quantidade necessária que foi predeterminada.

São extensões do MCLP:

- *MCLP implicit and explicit*: adaptações semelhantes às feitas pelo mesmo autor na extensão *location set covering problem*, descrito na Seção 3.1.1.1 (MURRAY; TONG; KIM, 2010 apud FARAHANI et al., 2012).
- *Planar Maximal Covering*: as facilidades não estão em uma rede, ou seja, os pontos candidatos não são discretos. O problema de localização máxima de cobertura planar considera a distância euclidiana e distância retilínea (CHURCH, 1984 apud FARAHANI et al., 2012). Define-se por Métrica Euclidiana, a utilização de uma reta para se definir o caminho mais curto entre dois pontos. Já a Métrica Retangular, tratada por alguns autores como Retilínea, é aquela em que se considera apenas traçados perpendiculares para se calcular uma distância entre dois pontos, e é considerada mais coerente aos traçados de ruas e avenidas em áreas urbanas (PIZZOLATO, 2003 apud BITENCOURT, 2005).
- *Capacitated MCLP*: versão onde as facilidades possuem uma capacidade que pode impedi-las de cobrir alguma demanda. No mesmo estudo desenvolvido para *SCP* e citado na Seção 3.1.1.1, Current e Storbeck (1988 apud FARAHANI et al., 2012) também abordam o *MCLP*.
- *MCLP with mandatory closeness constraints*: considerando que se conhece o número ótimo  $P$  de facilidades para cobrir toda a demanda e que existem múltiplas soluções de pontos para instalação, o modelo desconsidera a proximidade média para instalação das facilidades e maximiza a população coberta dentro de um tempo ou distância desejáveis (LOVE; MORRIS; WESOLOWSKY, 1988 apud FARAHANI et al., 2012).
- *Maximum Covering Location-interdiction Problem*: O'Hanley e Church (2011) desenvolveram um modelo de cobertura robusta em que o objetivo foi maximizar a combinação entre a cobertura considerando o número  $P$  de facilidades iniciais instaladas e o nível mínimo de cobertura no pior caso, com a interdição de um conjunto  $p \in P$  de facilidades.
- *Median Tour Problem (MTP) and Maximal Covering Tour Problem (MCTP)*: Current e

Schilling (1994) apresentam uma estratégia bi-critério para o problema de roteamento, englobando o problema das medianas e da máxima cobertura. Na segunda etapa, MCTP, os objetivos são minimizar a distância percorrida e maximizar a demanda total coberta dentro de uma distância máxima predefinida a partir de um ponto de parada. Os autores concluíram que o MCTP pode ser considerado um caso especial de MTP e, com isso, o procedimento desenvolvido para um pode ser usado para resolução do outro.

- *Partial Coverage Problem*: nas versões anteriores, a cobertura é uma variável binária, ou seja, a demanda é coberta ou não, considerando se a facilidade mais próxima dela está a uma distância inferior ao limite  $S$  definido. Nesta extensão, algumas demandas não precisam ser rigorosas nesse critério e a cobertura se dá por uma função decrescente da distância da instalação para a localização do cliente (BERMAN; KRASS, 2002 apud FARAHANI et al., 2012).
- *Generalized MCLP (GMCLP)*: por acreditarem que algumas definições rigorosas de cenário são irreais, Berman, Drezner e Krass (2010) apresentaram uma visão geral das pesquisas já realizadas em que alguns pré-requisitos do problema de cobertura são relaxados. A cobertura binária foi substituída pelo conceito de cobertura gradual, a cobertura individual, dada por apenas uma facilidade, foi substituída por um mecanismo onde todas as facilidades contribuem para a cobertura de uma demanda, e o raio fixo de cobertura foi modificado para um raio variável de acordo com o tipo da facilidade.
- *Gradual Coverage*: ainda na linha da relaxação dos pré-requisitos, esse modelo estabelece dois raios de cobertura,  $S_1$  e  $S_2$ , onde  $S_1 < S_2$ . Uma demanda é considerada totalmente coberta se a facilidade mais próxima está a uma distância  $d$  da demanda tal que  $d \leq S_1$ . Caso  $S_1 \leq d \leq S_2$ , a facilidade está parcialmente coberta. Quando  $d \geq S_2$ , aquela demanda nunca estará coberta (BERMAN; KRASS; DREZNER, 2003 apud FARAHANI et al., 2012).
- *Backup Coverage Location Problem (BCLP)*: dentro dos conceitos apresentados na Seção 3.1.1.1, aplicáveis para SLP e MCLP, vários autores desenvolveram tópicos sobre o problema. Em um deles, aplicado ao patrulhamento policial, foi criado um parâmetro  $h_i$  que indica, através de peso, a prioridade de atendimento de incidentes mais sérios, conforme dados históricos e o auxílio de informações geográficas. O objetivo passa a ser não só a cobertura de um maior número de demandas como, também, prioriza aquelas em que é dado maior peso por serem mais graves. Por se tratar de um problema de maximização, quanto mais incidentes graves forem cobertos, maior será o resultado da função objetivo (CURTIN; HAYSLETT-MCCALL; QIU, 2010).
- *p-Maximal Cover Problem*: problema bi-objetivo, uma combinação do *p-maximal cover problem* com o *p-partial center problem*, onde o objetivo é encontrar os locais que minimizam a distância máxima entre a demanda e a facilidade mais próxima

(BERMAN, 1994 apud FARAHANI et al., 2012).

- *Quadratic MCLP*: modelo composto por uma função quadrática, assume que as demandas podem ser geradas não só nos nós (demandas estacionárias) mas também pelo caminhos (demanda em movimento). Erdemir et al. (2008) aplicaram esse conceito no estudo de cobertura de sinal em telefonia móvel.
- *Multiple Facility Quantity-of-coverage*: modelo em que o número de facilidades instaladas é redundante para casos rotineiros mas que considera situações de emergência em larga escala, como terrorismo e desastres naturais, para definir os pontos onde estarão os suprimentos médicos. Portanto, duas decisões são levadas em consideração: a quantidade de facilidades necessárias nesses casos imprevisíveis e a qualidade da cobertura, relacionada à proximidade do ponto de demanda (JIA; ORDÓÑEZ; DESSOUKY, 2007).
- *Complementary Edge Covering Problem*: dado um grafo, o problema *total edge covering problem* consiste em atribuir a cada aresta um único vértice de forma a cobri-las em sua totalidade. Neste novo modelo a cobertura parcial de uma aresta é permitida. Cada aresta pode ser coberta por vários vértices de forma que uma complemente a outra e, no total, a cubra totalmente. Aplicado em localização de serviços de emergência onde a demanda do cliente é distribuída uniformemente nos caminhos entre os locais (SADIGH; MOZAFARI; KASHAN, 2010 apud FARAHANI et al., 2012).
- *Probabilistic MCLP*: com adaptações semelhantes às realizadas por ReVelle e Hogan (1989 apud FARAHANI et al., 2012) e citadas na Seção 3.1.1.1, ReVelle e Hogan (1989 apud FARAHANI et al., 2012) apresentam uma versão probabilística para o MCLP, denominado MALP (*Maximum Availability Location Problem*), ao modelar o problema usando uma probabilidade  $\alpha$  de disponibilidade da facilidade, com o objetivo de maximizar a população coberta. Em MALP I, a taxa de ocupação das ambulâncias é única e definida de acordo com a taxa de ocupação média do sistema,  $q$ , conforme apresentado na Equação (69), sendo  $\bar{t}$  a duração média de atendimento. Os demais parâmetros  $a_i$  e  $P$ , e a variável  $x_j$ , já apresentados anteriormente, definem a quantidade de chamados por nó de demanda, a quantidade total de ambulâncias e se existe um ambulância alocada no nó  $j$ , respectivamente. O número mínimo de ambulâncias necessárias para cobrir um nó no nível de confiança  $\theta$  é dado por  $b$  (Equação (70)). Portanto, semelhante à Equação (17) onde se tem uma variável  $y_i^k$ , onde  $k = 2$  e refere-se ao número mínimo de ambulâncias que cobrem a demanda  $i$ , em MALP I,  $k = b$ .

$$q = \frac{\bar{t} \sum_{i \in I} a_i}{24 \sum_{j \in J} x_j} = \frac{\bar{t} \sum_{i \in I} a_i}{24P} \quad (69)$$

$$b = \frac{\log(1 - \theta)}{\log(q)} \quad (70)$$

Já na segunda versão, em MALP II, é estimada uma taxa de ocupação local,  $q_i$ , para cada demanda  $i \in I$ . Esse valor corresponde à probabilidade de que uma ambulância que está localizada na vizinhança  $M_i$  de  $i$  esteja ocupada. Analogamente à  $N_i$ , é definido um conjunto  $M_i$  somente com pontos  $i \in I$  que estão dentro do limite de cobertura, tal que  $d_{ij} \leq S_i$  e, assim, definida a vizinhança de  $i$ , região isolada onde as ambulâncias alocadas nela atendem apenas aos chamados originados de lá. O limite inferior de ambulâncias necessárias para cobrir cada nó no nível de confiança  $\theta$  é dado por  $b_i$ . A utilização de vizinhança para definir uma taxa de ocupação local é uma alternativa dada à complexidade de se definir uma taxa de ocupação  $q_j$  por ambulância, uma vez que os pontos de alocação das facilidades compõem uma variável do modelo e portanto, são desconhecidas *a priori* (BROTCORNE; LAPORTE; SEMET, 2003). Algumas evoluções de modelos com abordagens estocásticas e que tratam determinados parâmetros como probabilísticos serão detalhados a seguir.

ReVelle e Marianov (1991) propuseram versões probabilísticas para o modelo FLEET, apresentado anteriormente pela Equação (26), em um estudo de caso para o Corpo de Bombeiros. Para facilitar a compreensão, os parâmetros e variáveis serão detalhados dentro do contexto do serviço de emergência pré-hospitalar. No modelo P-FLEET-MC (*Probabilistic FLEET model with multiple co-location*), deseja-se localizar  $P^Z$  bases,  $P^A$  ambulâncias do tipo avançado e  $P^B$  do tipo básico para maximizar a demanda coberta por pelo menos uma ambulância de cada tipo, alocadas independentemente uma da outra e com um nível de confiança  $\alpha$ . As taxas de ocupação estimadas  $q_i^u$  são taxas locais, com base na noção de vizinhança de uma demanda conforme apresentado em MALP II. Por se tratar de dois tipos  $u$  de ambulâncias, com  $u = A$  ou  $u = B$ , tem-se a vizinhança  $M_i^A$  e  $M_i^B$ , assim como os conjuntos de pontos  $N_i^A$  e  $N_i^B$ , candidatos a cobrir a demanda  $i$ . Os parâmetros  $\bar{t}$ ,  $a_i$  e  $x_j$  já foram descritos anteriormente com a diferença de que, agora, passam a serem específicos para cada tipo de ambulância. A partir do cálculo da taxa de ocupação local (Equação (71)), chega-se à probabilidade de pelo menos uma ambulância do tipo  $u$  estar disponível quando uma demanda for originada do nó  $i$ , e é apresentada pela Equação (72).

$$q_i^u = \frac{\bar{t}^u \sum_{i \in M_i^u} a_i}{24 \sum_{j \in N_i^u} x_j^u} = \frac{F_i^u}{\sum_{j \in N_i^u} x_j^u}, \quad \forall i, \forall u \quad (71)$$

$$1 - (q_i^u)^{\sum_{j \in N_i^u} x_j^u} = 1 - \left( \frac{F_i^u}{\sum_{j \in N_i^u} x_j^u} \right)^{\sum_{j \in N_i^u} x_j^u} \geq \alpha \quad (72)$$

Através dessas equações, é possível definir um limite inferior  $b_i^u$  que corresponderá à quantidade mínima de ambulâncias do tipo  $A$  e  $B$  que deverão ser alocadas dentro do valor crítico de cobertura  $S_i^u$  para que cada nó de demanda  $i$  seja considerado coberto com

um nível independente de confiança  $\alpha$ , conforme Inequação (73).

$$1 - \left( \frac{F_i^u}{b_i^u} \right) \geq \alpha \quad (73)$$

O objetivo do P-FLEET-MC é maximizar o número de chamados que possuam  $b_i^A$  ambulâncias avançadas e  $b_i^B$  ambulâncias básicas dentro dos limites de cobertura preestabelecidos. A variável  $y_i$  permanece a mesma do modelo clássico, embora o conceito de cobertura agora seja outro. Em P-FLEET-MC uma demanda é considerada coberta se existe uma ambulância do tipo A e uma do tipo B que atenda o nó  $i$  dentro do valor crítico  $S_i^A$  e  $S_i^B$ , respectivamente. Além dela, foram criadas duas novas variáveis:  $y_{ik}^A$ , que retorna 1 se a demanda originada em  $i$  é coberta pelo menos  $k$  vezes por ambulâncias avançadas, e  $y_{ik}^B$ , que retorna 1 se a demanda originada em  $i$  é coberta pelo menos  $k$  vezes por ambulâncias básicas. Caso contrário, o valor retornado é zero, em ambos os casos. As variáveis  $x_j^A$  e  $x_j^B$ , que informam os pontos onde as ambulâncias serão alocadas, ganham o índice  $k = 1, 2, \dots, C$ , que refere-se ao número de veículos que foram alocados em cada ponto  $j$  que possui capacidade de receber  $C$  ambulâncias do tipo A e a mesma quantidade do tipo B.

$$\text{maximizar } \sum_{i \in I} a_i y_i, \quad (74)$$

sujeito a:

$$y_i + \sum_{k=1}^{b_i^A-1} y_{ik}^A \leq \sum_{j \in N_i^A} \sum_{k=1}^C x_{kj}^A, \quad i \in I, \quad (75)$$

$$y_i + \sum_{k=1}^{b_i^B-1} y_{ik}^B \leq \sum_{j \in N_i^B} \sum_{k=1}^C x_{kj}^B, \quad i \in I, \quad (76)$$

$$y_i \leq y_{i(b_i^A-1)}^A, \quad i \in I, \quad (77)$$

$$y_i \leq y_{i(b_i^B-1)}^B, \quad i \in I, \quad (78)$$

$$y_{ik}^A \leq y_{i(k-1)}^A, \quad i \in I, k = 2, 3, \dots, b_i^A - 1, \quad (79)$$

$$y_{ik}^B \leq y_{i(k-1)}^B, \quad i \in I, k = 2, 3, \dots, b_i^B - 1, \quad (80)$$

$$x_{1j}^A \leq z_j, \quad j \in J, \quad (81)$$

$$x_{1j}^B \leq z_j, \quad j \in J, \quad (82)$$

$$x_{kj}^A \leq x_{(k-1)j}^A, \quad \forall j \in J, k = 2, 3, \dots, C, \quad (83)$$

$$x_{kj}^B \leq x_{(k-1)j}^B, \quad \forall j \in J, k = 2, 3, \dots, C, \quad (84)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k=1}^C x_{kj}^A = P^A, \quad (85)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k=1}^C x_{kj}^B = P^B, \quad (86)$$

$$\sum_{j \in J} z_j = P^Z, \quad (87)$$

$$x_{kj}^A, x_{kj}^B, z_j \in \{0,1\}, \quad \forall j \in J, k = 1, 2, \dots, C, \quad (88)$$

$$y_i, y_{ik}^A, y_{ik}^B \in \{0,1\}, \quad \forall i \in I, k = 1, 2, \dots, b_i^u, u = A, B. \quad (89)$$

A função objetivo (74) maximiza a demanda coberta, conforme critérios probabilísticos já explicados. A garantia de cobertura pelos dois tipos de veículos é dada pelas restrições (75) e (76). Se uma demanda é coberta por pelo menos  $k$  veículos ela é coberta por valores menores que  $k$ . O mesmo acontece com a alocação das ambulâncias. Se um ponto  $j$  recebe  $k$  veículos de determinado tipo, para todos os valores menores que  $k$  essa alocação também acontece. Essas condições estão expressas nas restrições (77), (78), (79), (80), (83) e (84). Uma ambulância, de qualquer tipo, só poderá ser alocada no ponto  $j$  caso haja uma base localizada nesse mesmo ponto, restrição garantida por (81) e (82). A quantidade de bases/ambulâncias disponíveis para instalação/alocação, obedece as restrições (85), (86) e (87). Nas restrições (88) e (89) são definidos os domínios das variáveis.

Marianov e ReVelle (1996) apresentam uma evolução do modelo MALP que utiliza conceitos da Teoria de Filas para estimar a taxa de ocupação das ambulâncias,  $q_i$ , e o número mínimo de ambulâncias  $b_i$  necessárias para que uma demanda seja coberta, propondo um modelo mais realista, chamado de Q-MALP (*Queueing MALP*). Para esse modelo assume-se que:

- a taxa de chamados originados em um nó  $i$  não se difere tanto da taxa de chamados originados em um nó vizinho de  $i$ ;
- existem casos em que chamados originados fora do conjunto  $N_i$  acionarão ambulâncias localizadas dentro de  $N_i$  e vice-versa. A frequência de ambas situações é similar e, portanto, um fluxo anularia o outro.
- o tempo de viagem dentro da vizinhança ou para áreas adjacentes é pequeno se comparado ao tempo total de atendimento.

Com isso, cada área é considerada como uma unidade isolada e independente cujos nós de demanda e de facilidades  $i$  e  $j$  de cada região interagem unicamente um com o outro. Além disso, após o modelo ser aplicado, o total de ambulâncias de cada tipo  $u$  que cobrem cada nó  $i$ , dado por  $\sum_{j \in N_i} x_j^u$ , será maior ou igual à confiança  $\alpha$ . Portanto, para praticamente todos os chamados originados de  $i$  será encontrada uma ambulância disponível, e, com isso, o fluxo de veículos entre regiões será feita esporadicamente e, então, ignorada nesse cálculo (MARIANOV; REVELLE, 1996).

Como objetivo, tem-se a maximização das demandas que possuam uma ambulância disponível no momento do chamado dentro do valor crítico de cobertura, considerada neste caso uma variável randômica, com confiança  $\alpha$ . Por isso, além das mudanças no cálculo de  $b_i$ , o conjunto de pontos candidatos a cobrir cada demanda,  $N_i$ , é variável

O parâmetro  $b_i$  é calculado através do sistema de filas M/G/s/s, onde considera-se que os chamados chegam por unidades de tempo independentes com variáveis aleatórias identicamente distribuídas conforme distribuição de Poisson e intensidade  $\lambda_i$ , e os tempos de atendimento de cada demanda são identicamente distribuídas e seguem uma distribuição normal com taxa média  $\mu_i$ . Além disso, assume-se  $s$  ambulâncias disponíveis na vizinhança de  $i$  para até  $s$  chamados recebidos ao mesmo tempo. Sob condições de Estados Estáveis, a probabilidade  $p_K$  do sistema operar com  $K$  ambulâncias ocupadas é obtida através do Diagrama de Transição de Taxa, onde  $P[ocupadas] - P[livres] = 0$  e apresentado nas Equações (90) e (91). Para  $k = s$ , é apresentada a Equação (92).

$$[p_{K-1}\lambda_i + (K + 1)\mu_i p_{K+1}] - [p_K\lambda_i + K\mu_i p_K] = 0, \quad s = 1, 2, 3, \dots, s. \quad (90)$$

Para  $k=0$ :

$$\mu_i p_1 - p_0 \lambda_i = 0 \quad (91)$$

Para  $k = s$ :

$$p_s = \frac{(1/s!)p_i^{b_i}}{1 + p_i + (1/2!)p_i^2 + \dots + (1/s!)p_i^s} \quad (92)$$

A fórmula recursiva para  $p_s$  com função de  $p_{s-1}$  fornece a probabilidade de pelo menos uma ambulância estar livre na região  $i$ , conforme Equação (93). Se  $1 - p_s \geq \alpha$ , assume-se que o nó  $i$  será coberto dentro do nível de confiança  $\alpha$ . O número mínimo de ambulâncias necessárias para isso,  $b_i$  é dado pelo menor inteiro que satisfaça a formulação (94).

$$p_s = \left( \frac{1}{p_{s-1} + (s\mu_i/\lambda_i)} \right) p_{s-1} \quad (93)$$

$$\frac{(1/b_i!)p_i^{b_i}}{1 + p_i + (1/2!)p_i^2 + \dots + (1/b_i!)p_i^{b_i}} \quad (94)$$

O conjunto de pontos  $N_i$  é dado pelos nós  $j$  que são candidatos a atender a uma demanda  $i$  dentro do tempo crítico  $S$  com probabilidade  $\beta$ . Assume-se que esse tempo possui distribuição normal e, portanto,  $N_i = \{j | P(d_{ij} \leq S) \geq \beta\}$ . Sendo  $F_z(x)$  a função de distribuição normal acumulada,  $\bar{d}_{ij}$  o tempo de trajeto esperado entre a demanda  $i$  e a facilidade  $j$  e  $\sigma_{ij}$  o desvio padrão de  $d_{ij}$ , é possível encontrar o menor valor  $K_\beta$  tal que  $F_z(K_\beta) = \beta$  e, assim, determinar o conjunto  $N_i = \{j | \bar{d}_{ij} + K_\beta \sigma_{ij} \leq S\}$ .

Apesar do modelo apresentar importantes avanços no cálculo da taxa de ocupação das ambulâncias, algumas características já apresentadas anteriormente não são contempladas em Q-MALP. É considerado apenas um tipo de ambulância e a localização das bases e alocação dos veículos é feita de forma conjunta através de uma única variável. A capacidade de alocação de ambulâncias  $C$  deixa de ser única e tem-se uma capacidade de ambulâncias que podem ser instaladas em cada ponto  $j$ ,  $C_j$ . São utilizadas duas variáveis:  $y_{ik}$  e  $x_{kj}$ , binárias e já detalhadas anteriormente, e que se referem ao fato de um número  $k$  de ambulâncias estarem cobrindo a demanda  $i$  e alocadas na base  $j$ , respectivamente.

$$\text{maximizar } \sum_{i \in I} a_i y_{ik}, \quad k = b_i, \quad (95)$$

sujeito a:

$$\sum_{k=1}^{b_i} y_{ik} \leq \sum_{j \in N_i} \sum_{k=1}^{C_j} x_{kj}, \quad \forall i \in I, \quad (96)$$

$$y_{ik} \leq y_{i(k-1)}, \quad \forall i, k = 2, 3, \dots, b_i, \quad (97)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{k=1}^{C_j} x_{kj} = P, \quad (98)$$

$$x_{kj}, y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, \forall j, \forall k. \quad (99)$$

Como todos os problemas derivados do modelo clássico de MCLP, a função objetivo (95) maximiza a demanda coberta, dada por aquelas regiões onde se tem  $b_i$  ambulâncias disponíveis dentro do tempo crítico  $S$  e nível confiança  $\alpha$ . A restrição (96) garante que uma dada demanda  $i$  é considerada coberta somente se houver uma ambulância instalada em um ponto candidato  $j$  tal que  $d_{ij} \leq S$ . A restrição (97) assegura que se um ponto é coberto por  $k$  ambulâncias ele também é coberto por valores menores que  $k$ . O número total de ambulâncias existentes para alocação é definido na restrição (98). O modelo trabalha apenas com variáveis binárias, conforme restrição (99).

Um outro modelo que traz importantes contribuições para o problema de máxima cobertura em serviços de emergência é o TTM (*Two-Tier Model*), proposto por Mandell (1998). Nele, são considerados dois tipos de ambulância, básica e avançada, e um tempo crítico de cobertura para cada um,  $S^A$  e  $S^B$ , com  $S^B \leq S^A$ . Pelo fato do tipo avançado ter UTI móvel e uma disponibilidade de unidades menor, espera-se que ambulância básica seja capaz de atender à maioria dos chamados mais simples, deixando os casos mais graves para as USAs. Mas, entende-se que, uma ambulância avançada, pode atender qualquer tipo de demanda e essa característica é contemplada em TTM. São estabelecidos dois casos em que a demanda  $i$  pode ser considerada coberta:

- se uma demanda  $i$  é atendida por uma USB dentro do tempo  $S^B$  e por uma USA dentro do tempo  $S^A$  ou;
- se uma demanda  $i$  é atendida por uma USA dentro do tempo  $S^B$ , independente do menor tempo conseguido por uma USB.

Para calcular a probabilidade de um chamado originado do nó  $i$  ser atendido adequadamente foi definido o parâmetro  $\theta_{rr's}^i$ , sendo  $r$  o número de USAs capazes de cobrir a demanda  $i$  dentro de  $S^A$ ,  $r'$  o número de USAs capazes de cobrir a demanda  $i$  dentro de  $S^B$  e  $s$  o número de USBs capazes de cobrir a demanda  $i$  dentro de  $S^B$ . A estimativa de  $\theta_{rr's}^i$  é realizada com base nos conceitos de teoria de filas, com espaços de estados bi-dimensionais uma vez que são dois tipos de ambulâncias com dois tempos críticos e, conseqüentemente, dois conjuntos de vizinhança. Mais detalhes sobre o cálculo são encontrados em (MANDELL, 1998).

# Anexos

# **ANEXO A – Parecer Ético**



PREFEITURA  
BELO HORIZONTE

SECRETARIA MUNICIPAL DE  
SAÚDE DE BELO HORIZONTE/  
SMSA-BH



## PARECER CONSUBSTANCIADO DO CEP

### DADOS DO PROJETO DE PESQUISA

**Título da Pesquisa:** SISTEMAS INTELIGENTES APLICADOS À ROTINA E AO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DO SAMU-BH

**Pesquisador:** MARIANA MENDES GUIMARAES

**Área Temática:**

**Versão:** 1

**CAAE:** 78572917.9.0000.5140

**Instituição Proponente:** Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**Patrocinador Principal:** Financiamento Próprio

### DADOS DO PARECER

**Número do Parecer:** 2.361.551

#### **Apresentação do Projeto:**

A pesquisa intitulada 'Sistemas Inteligentes Aplicados à Rotina e ao Planejamento Estratégico do SAMU-BH' utilizará de ferramentas da Pesquisa Operacional para desenvolver soluções que otimizem o serviço pré-hospitalar prestado pelo Serviço de Atendimento Móvel de Urgência da cidade de Belo Horizonte, MG. A Pesquisa Operacional é o ramo da matemática que auxilia processos de tomada de decisão com o uso de modelos matemáticos, estatísticos e de algoritmos. O objetivo deste trabalho é desenvolver modelos matemáticos que possibilitem uma configuração de pontos de localização de bases e ambulâncias que contribua para a redução do tempo de resposta às ocorrências atendidas pelo SAMU-BH e maximize a cobertura adequada dos chamados.

Para o desenvolvimento da pesquisa em questão, é necessária a análise dos dados históricos dos chamados realizados ao SAMU que envolveram empenho de uma das ambulâncias para que seja possível identificar as características das ocorrências e, assim, representá-las através de um modelo matemático. Os dados serão coletados através do acesso aos prontuários médicos de atendimento referentes a um período de 12 meses consecutivos fechando, assim, o ciclo de um ano. Serão analisados os tempos de atendimento e os trajetos realizados pelas ambulâncias conforme o bairro e o tipo da ocorrência. A partir dessas informações será possível gerar modelos de simulação do tempo de deslocamento da equipe até a vítima, a partir do empenho da ambulância, considerando: a configuração atual das bases e ambulâncias; um cenário com a

**Endereço:** Rua Frederico Bracher Júnior, 103/3º andar/sala 302

**Bairro:** Padre Eustáquio

**CEP:** 30.720-000

**UF:** MG

**Município:** BELO HORIZONTE

**Telefone:** (31)3277-5309

**E-mail:** coep@pbh.gov.br

Continuação do Parecer: 2.361.551

realocação das ambulâncias nas bases já existentes; um cenário com novas localização das bases para as ambulâncias já existentes; um cenário com um maior número de ambulâncias; um cenário com um maior número de bases. Não é alvo deste trabalho qualquer informação ou estudo sobre o estado clínico do paciente.

Ao final do trabalho serão apresentados os pontos ideais para localização das ambulâncias, considerando as restrições existentes quanto ao espaço físico necessário para instalação das bases. Além disso, será possível simular os tempos de respostas aos chamados e medir sua eficiência ao compará-los com os tempos históricos.

### **Objetivo da Pesquisa:**

Hipótese:

A otimização na localização dos pontos de instalação das bases para as ambulâncias avançadas e básicas do SAMU-BH reduz o tempo de resposta às ocorrências e contribui para a melhoria do nível de serviço à população.

Objetivo Primário:

O objetivo deste trabalho é desenvolver modelos matemáticos que possibilitem uma configuração de pontos de localização de bases e ambulâncias que contribua para a redução do tempo de resposta às ocorrências atendidas pelo SAMU-BH e maximize a cobertura adequada dos chamados.

Com o acesso a dados históricos dos chamados será possível gerar modelos de simulação do tempo de deslocamento da equipe até a vítima, a partir do empenho da ambulância, considerando:- A configuração atual das bases e ambulâncias;- Um cenário com a realocação das ambulâncias nas bases já existentes;- Um cenário com novas localização das bases para as ambulâncias já existentes;- Um cenário com um maior número de ambulâncias;- Um cenário com um maior número de bases.

### **Avaliação dos Riscos e Benefícios:**

Exposição dos dados pessoais do paciente (nome, idade e endereço) ao pesquisador responsável por coletar os dados referentes à ocorrência e à ambulância.

Benefícios:

Atendimentos mais ágeis aos chamados realizados ao SAMU-BH e, conseqüentemente, possibilidade de diminuição de óbitos, mais disponibilidade para atender um número maior de chamados, redução no tempo de espera par atendimento e melhoria do nível de serviço à

**Endereço:** Rua Frederico Bracher Júnior, 103/3º andar/sala 302

**Bairro:** Padre Eustáquio

**CEP:** 30.720-000

**UF:** MG

**Município:** BELO HORIZONTE

**Telefone:** (31)3277-5309

**E-mail:** coep@pbh.gov.br

Continuação do Parecer: 2.361.551

população.

**Comentários e Considerações sobre a Pesquisa:**

Trata-se de estudo que pode trazer benefícios para otimização dos serviços de urgências, com a simulação dos melhores pontos de localização das bases do SAMU e desenho dos melhores trajetos utilizando-se para isto, dos dados secundários de ocorrência dos eventos em Belo Horizonte.

**Considerações sobre os Termos de apresentação obrigatória:**

A Folha de Rosto assinada pelo(a) pesquisador(a) MARIANA MENDES GUIMARAES e pelo representante da Instituição proponente foi devidamente apresentada.

Carta de anuência da Instituição Coparticipante da pesquisa foi apresentada.

**Conclusões ou Pendências e Lista de Inadequações:**

O Comitê de Ética em Pesquisa da Secretaria Municipal de Saúde de Belo Horizonte, não encontrando objeções éticas e verificando que o projeto cumpriu os requisitos da Resolução CNS 466/12, considera aprovado o projeto SISTEMAS INTELIGENTES APLICADOS À ROTINA E AO PLANEJAMENTO ESTRATÉGICO DO SAMU-BH.

**Considerações Finais a critério do CEP:**

O pesquisador deve desenvolver a pesquisa conforme delineada no protocolo aprovado e descontinuar o estudo somente após análise das razões da descontinuidade pelo CEP que o aprovou, aguardando seu parecer, exceto nos casos previstos na Resolução CNS 466/12. Eventuais modificações ou emendas ao protocolo devem ser previamente apresentadas para apreciação do CEP através da Plataforma Brasil, identificando a parte do protocolo a ser modificada e suas justificativas.

Relatórios semestrais, a partir da data de aprovação, devem ser apresentados ao CEP para acompanhamento da pesquisa. Ao término da pesquisa deve ser apresentado relatório final.

**Este parecer foi elaborado baseado nos documentos abaixo relacionados:**

Tipo Documento	Arquivo	Postagem	Autor	Situação
Informações Básicas do Projeto	PB_INFORMAÇÕES_BÁSICAS_DO_PROJETO_1006939.pdf	02/10/2017 12:10:44		Aceito

**Endereço:** Rua Frederico Bracher Júnior, 103/3º andar/sala 302

**Bairro:** Padre Eustáquio

**CEP:** 30.720-000

**UF:** MG

**Município:** BELO HORIZONTE

**Telefone:** (31)3277-5309

**E-mail:** coep@pbh.gov.br



**PREFEITURA  
BELO HORIZONTE**

**SECRETARIA MUNICIPAL DE  
SAÚDE DE BELO HORIZONTE/  
SMSA-BH**



Continuação do Parecer: 2.361.551

Projeto Detalhado / Brochura Investigador	Projeto_de_Pesquisa_CefetMG_SMSAB H.pdf	02/10/2017 11:57:45	MARIANA MENDES GUIMARAES	Aceito
Folha de Rosto	FolhadeRosto_assinada.pdf	02/10/2017 11:56:37	MARIANA MENDES GUIMARAES	Aceito
Outros	Carta_de_Anuencia.pdf	02/10/2017 07:50:21	MARIANA MENDES GUIMARAES	Aceito

**Situação do Parecer:**

Aprovado

**Necessita Apreciação da CONEP:**

Não

BELO HORIZONTE, 01 de Novembro de 2017

---

**Assinado por:  
Eduardo Prates Miranda  
(Coordenador)**

**Endereço:** Rua Frederico Bracher Júnior, 103/3º andar/sala 302

**Bairro:** Padre Eustáquio

**CEP:** 30.720-000

**UF:** MG

**Município:** BELO HORIZONTE

**Telefone:** (31)3277-5309

**E-mail:** coep@pbh.gov.br