



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

MODELOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS AO PROBLEMA DE MÁXIMA COBERTURA: ESTUDO DE CASO DO SAMU-BH

CHARLES PAULINO DE OLIVEIRA

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Elisangela Martins de Sá

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Vinícius Cruzeiro Martins

BELO HORIZONTE
FEVEREIRO DE 2020

CHARLES PAULINO DE OLIVEIRA

**MODELOS DE OTIMIZAÇÃO APLICADOS AO
PROBLEMA DE MÁXIMA COBERTURA:
ESTUDO DE CASO DO SAMU-BH**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Administração do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Administração.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Elisangela Martins de Sá

Coorientador: Prof. Dr. Flávio Vinícius Cruzeiro Martins

BELO HORIZONTE
FEVEREIRO DE 2020

Oliveira, Charles Paulino de
O48m Modelos de otimização aplicados ao problema de máxima
cobertura: estudo de caso do SAMU-BH. / Charles Paulino de
Oliveira. -- Belo Horizonte, 2020.
xiv, 100 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Administração, 2019.

Orientador: Profa. Dra. Elisangela Martins de Sá

Bibliografia

1. Pesquisa Operacional. 2. Otimização Multiobjetivo. 3. Métodos
de Simulação - Ambulâncias. I. Sá, Elisangela Martins de. II. Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 658.4034



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO DO CEFET-MG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM ADMINISTRAÇÃO do(a) Senhor(a) Charles Paulino de Oliveira. No dia 27 de fevereiro de 2020, às 16h00min, reuniu-se no Campus II do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, a Banca Examinadora de dissertação designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Administração do CEFET-MG para julgar o trabalho final intitulado “**Modelos de Otimização Aplicados ao Problema de Máxima Cobertura: estudo de caso do SAMU-BH.**”, requisito para a obtenção do **Grau de Mestre em Administração**, linha de pesquisa: **Processos e Sistemas Decisórios em Arranjos Organizacionais**. Abrindo a sessão, o(a) Senhor(a) Presidente da Banca, Prof.(a) Dr.(a) Elisângela Martins de Sá, após dar conhecimento aos presentes do teor das Normas Regulamentares do Trabalho Final, passou a palavra ao(à) aluno(a) para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores com a respectiva defesa do(a) aluno(a). Logo após, a Banca se reuniu, sem a presença do aluno e do público, para julgamento e expedição do seguinte resultado final:

- Aprovação.
- Aprovação com recomendação de aperfeiçoamento, condicionada à satisfação das exigências feitas pela banca examinadora.
- Recomendação de reapresentação.
- Reprovação.

O resultado final foi comunicado publicamente ao(à) aluno(a) pelo(a) Senhor(a) Presidente da Banca. Nada mais havendo a tratar, o(a) Senhor(a) Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ATA, que será assinada por todos os membros participantes da Banca Examinadora.

Belo Horizonte, 27 de fevereiro de 2020.

Assinaturas:

Profa. Dra. Elisângela Martins de Sá (Orientadora-PPGA-CEFET-MG)

Prof. Dr. Flávio Vinícius Cruzeiro Martins (Coorientador-CEFET-MG)

Prof. Dr. Felipe Dias Paiva (PPGA-CEFET-MG)

Prof. Dr. Pedro Marinho Sizenando Silva (IFMG)

Dedico este trabalho em especial aos meus pais e a minha irmã, por sempre terem me apoiado em todos os meus sonhos.

Aos meus orientadores, Elisângela e Flávio, pela amizade, atenção, disposição e ensinamentos.

Aos meus amigos da vida e aos amigos do CEFET-MG, pelo apoio nesta jornada.

Agradecimentos

Agradeço imensamente aos meus pais e minha irmã, por acreditarem no meu sonho e pelo exemplo de amor, dedicação e caráter. Vocês são minha fonte de inspiração!

Aos meus orientadores, Elisangela e Flávio, pela grande oportunidade de pesquisa, pelos ensinamentos, paciência, amizade, aprendizado e pelas reuniões as quintas-feiras. Vocês são brilhantes!

Ao CEFET-MG, em especial ao PPGA, PPGMMC e DECOM, pela oportunidade de estudar, aprender e conviver com professores de altíssimo nível. Foi extremamente proveitoso poder ter convivido nestes três departamentos simultaneamente.

Aos professores Felipe Dias Paiva e Pedro Marinho Sizenando Silva por participarem deste momento importante e pelas contribuições científicas.

Ao SAMU-BH e todos os profissionais que se empenham dia a dia na missão de salvar vidas, vocês são imensuravelmente importantes para a nossa sociedade!

Aos colegas de mestrado, pelo apoio, amizade e companheirismo em todos os momentos.

Ao meu colega de pesquisa Rodrigo Ferreira da Silva, pelo suporte e contribuições sempre pontuais.

Aos amigos e familiares que estiveram sempre me dando suporte nesta caminhada.

A equipe do PPSUS pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

A agência de fomento FAPEMIG pelo apoio ao desenvolvimento desta pesquisa.

“[...] graças sejam dadas a Deus, que nos concede sempre triunfar em Cristo, e que por nosso meio difunde o perfume do seu conhecimento em todo lugar.” (São Paulo, 2 Cor 2,14)

Resumo

O Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) exerce função importante para o sistema de saúde brasileiro, fornecendo atendimento a demandas emergenciais da população por serviços de primeiros socorros, transporte de vítimas ou transferência de pacientes entre hospitais. Para que o atendimento às vítimas que demandam por este serviço seja bem-sucedido é essencial que as ambulâncias cheguem aos locais de incidentes com agilidade. Um dos fatores que podem contribuir para que as ambulâncias cheguem até as vítimas de forma mais rápida refere-se às localizações das mesmas em locais que as permitam cobrir adequadamente suas demandas. Por isso, os gestores do SAMU devem estar atentos quanto a localização das bases de ambulâncias e a quantidade de veículos destinados a cada base, a fim de oferecer cobertura efetiva às demandas pelo serviço. Para auxiliar a tomada de decisão neste campo, a Pesquisa Operacional (PO) oferece um conjunto de métodos e ferramentas que podem indicar locais ideais para a instalação de bases e determinar a melhor forma de alocar ambulâncias. Por conseguinte, este trabalho visa a aplicar o Problema de Localização de Facilidades no SAMU da cidade de Belo Horizonte, Minas Gerais. O objetivo é contribuir com o desenvolvimento de modelos de otimização que dividem o dia em multiperíodos para tratar do problema de localização de bases, alocação e realocação de ambulâncias, de forma a maximizar a cobertura da demanda dentro de tempos de resposta satisfatórios. Trata-se de um estudo de caso com abordagem quantitativa, de natureza aplicada, com objetivo exploratório que se vale de duas técnicas da PO, a Simulação e a Programação Matemática. Baseados em referências da literatura, dois modelos são apresentados. A primeira formulação possui uma abordagem determinística enquanto a segunda se vale de uma abordagem estocástica. Além disso, aplica-se ao problema uma análise multiobjetivo que, visa maximizar a cobertura da demanda enquanto o número de bases instaladas é minimizado. Por fim um simulador é empregado, permitindo que as configurações propostas na otimização sejam comparadas entre si e também com as configurações atuais de operação. Os resultados obtidos na otimização indicam que a instalação de novas bases e/ou o deferimento para que as ambulâncias se alternem entre as bases ativas podem elevar o nível de cobertura do sistema em até 30% (para a formulação determinística) e em até 24,6% (para a formulação estocástica). Por meio da simulação é possível inferir que o modelo estocástico sem realocação gera os melhores resultados de cobertura e que, dado as configurações atuais de instalação das bases, a proposta de realocação sugerida pelo modelo estocástico é a que produz melhores resultados.

Palavras-chave: SAMU. Pesquisa Operacional. Otimização. Localização de Ambulâncias. Simulação.

Abstract

The Brazilian Emergency Medical System (SAMU), performs an important role for its healthcare system, providing emergency services to attend the population's need for first aid services, victims transports or patients transfers between hospitals. To assure a successful service for victims in need, it is essential that ambulances may reach incident sites' quickly. One of several factors that can affect the ambulances' agility to reach victims refers to its locations, vehicles shall be placed in a way that enables them to cover its demands properly. Therefore, SAMU managers must be aware with the location of ambulance bases and the number of vehicles assigned to each one, in order to afford effective coverage for its requests. To support the decision making process in this field, Operations Research (OR) offers a set of methods and tools that can indicate the ideal locations to install bases and determine the best way to allocate ambulances. Hence, this work aims to apply the Facility Location Problem in the SAMU of Belo Horizonte city, state of Minas Gerais. The objective is to contribute to the development of optimization models that divide the day into multi-periods to handle the problem of bases locations, and ambulances allocation/relocation, in order to maximize the coverage of demands within satisfactory response times. This is a case study with a quantitative and applied approach, with an exploratory objective that draws on two OR's techniques, Simulation and Mathematical Programming. Based on literature references, two models are presented. The first formulation has a deterministic approach while the second uses a stochastic approach. In addition, a multiobjective analysis is applied to the problem, aiming to maximize the coverage while the number of bases to be installed is minimized. Lastly, a simulator is used, allowing a comparison of the proposed settings by both optimization models and also a comparison of them with the current operating framework. Results from optimization suggest that the installation of new bases and/or the deferral for ambulances to move among bases may increase the coverage level of the system about to 30% (deterministic formulation) and about to 24,6% (stochastic formulation). Through simulation it is possible to infer that the stochastic model without reallocation generates the best coverage results. It is also observed that, given the current base locations, the reallocation proposal suggested by the stochastic formulation is the one that provides the best results.

Keywords: SAMU. Operations Research. Optimization. Ambulance Location. Simulation.

Lista de Figuras

Figura 1 – Representação genérica do atendimento de um EMS	6
Figura 2 – Formas para estudar um sistema	24
Figura 3 – Ilustração de um esquema de integração entre a simulação e a otimização	27
Figura 4 – Sequência de etapas para o desenvolvimento da presente pesquisa . .	39
Figura 5 – Interface gráfica do simulador	49
Figura 6 – Interface do processamento de chamados	50
Figura 7 – Evolução do volume de demandas por faixa horária	51
Figura 8 – Variação das demandas por USAs por dia da semana e faixa horária . .	54
Figura 9 – Variação das demandas por USBs por dia da semana e faixa horária . .	54
Figura 10 – Variação das demandas por USAs por faixa horária e regional	55
Figura 11 – Variação das demandas por USBs por faixa horária e regional	56
Figura 12 – Conjunto I de nós de demanda. Pontos centrais de 427 bairros da capital mineira	57
Figura 13 – Conjunto J de nós candidatos a instalação de facilidades. 1527 candidatos espalhados pelo território de Belo Horizonte	58
Figura 14 – Análise multiobjetivo para a formulação FLEET-ICt	67
Figura 15 – Análise multiobjetivo para a formulação LR-MEXCLP-ICt	67
Figura 16 – Quantidade de chamados cobertos USA para os cenários C1, C2 e C3 .	71
Figura 17 – Quantidade de chamados cobertos USB para os cenários C1, C2 e C3 .	71
Figura 18 – Quantidade de chamados cobertos USA para cada cenário	72
Figura 19 – Quantidade de chamados cobertos USB para cada cenário	72

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Chamados por faixa horária - USA e USB	52
Tabela 2 – Chamados por dia e por faixa horária - USA e USB	53
Tabela 3 – Resultados da implementação dos cenários propostos para o modelo FLEET-ICt	62
Tabela 4 – Resultados da implementação dos cenários propostos para o modelo LR-MEXCLP-ICt	63
Tabela 5 – Diferentes níveis de cobertura conforme o modelo LR-MEXCLP-ICt	65
Tabela 6 – Resumo dos resultados da simulação	69
Tabela 7 – Resumo dos resultados da simulação em relação ao tempo de resposta das USAs	69
Tabela 8 – Resumo dos resultados da simulação em relação ao tempo de resposta das USBs	70

Lista de Quadros

Quadro 1 – Localização das 25 bases do SAMU-BH em 2019	4
Quadro 2 – Comparativo entre as duas formulações	46
Quadro 3 – Localização da Central de Operações do SAMU-BH	61

Lista de Abreviaturas e Siglas

CEP	Código de Endereçamento Postal
DMEXCLP	<i>Dynamic Maximal Expected Covering Location Problem</i>
DSM	<i>Double Standard Model</i>
EMS	<i>Emergency Medical Service</i>
FLEET	<i>Facility Location and Equipment Emplacement Technique</i>
FLEET-IC	<i>Facility Location and Equipment Emplacement Technique with Independent Coverages</i>
FLEET-ICt	<i>Time Facility Location and Equipment Emplacement Technique with Independent Coverages</i>
LR-MEXCLP	<i>Local Reliability Maximal Expected Covering Location Problem</i>
LR-MEXCLP-ICt	<i>Local Reliability Maximal Expected Covering Location Problem with Independent Coverages</i>
LSCP	<i>Location Set Covering Problem</i>
MALP	<i>Maximum Availability Location Problem</i>
MCLP	<i>Maximal Covering Location Problem</i>
mDSM	<i>Multi-period Double Standard Model</i>
MEXCLP	<i>Maximal Expected Covering Location Problem</i>
PO	Pesquisa Operacional
PPSUS	Programa Pesquisa Para o SUS
P λ	Problema ponderado
P ϵ	Problema ϵ -restrito
P λ, ϵ	Problema de abordagem híbrida Ponderado e Restrito
P μ	Programação Alvo
P χ	Problema <i>Goal Attainment</i>
SAMU	Serviço de Atendimento Móvel de Urgência

SAMU-BH	Serviço de Atendimento Móvel de Urgência de Belo Horizonte
SED	Simulação de Eventos Discretos
TEAM	<i>Tandem Equipment Allocation Model</i>
TIMEXCLP	<i>Time Maximal Expected Covering Location Problem</i>
TR	Tempo de resposta
USA	Unidade de Suporte Avançada
USB	Unidade de Suporte Básico

Sumário

1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 Caracterização do SAMU	3
1.2 Justificativa	7
1.3 Problema	9
1.4 Objetivo geral e específicos	9
1.5 Organização do trabalho	9
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	10
2.1 Pesquisa operacional na área da saúde	10
2.2 O Problema da localização de facilidades	11
2.3 Localização de Facilidades em Serviços de Emergência	13
2.3.1 Problemas de Localização para Cobertura de Conjuntos	15
2.3.2 Problemas de Localização de Máxima Cobertura	16
2.4 Otimização Multiobjetivo	21
2.4.1 Método de escalarização Problema ϵ -Restrito (P_ϵ)	23
2.5 Simulação	24
3 – TRABALHOS RELACIONADOS	28
3.1 Estudos no Brasil	28
3.2 Estudos no Mundo	30
4 – METODOLOGIA	38
4.1 Definição dos modelos	40
4.1.1 Modelo determinístico	41
4.1.2 Modelo estocástico	43
4.1.3 Comparativo: FLEET-ICt x LR-MEXCLP-ICt	45
4.1.4 Abordagem multiobjetivo	46
4.1.5 Simulação	48
4.2 Coleta de dados	50
4.2.1 Análise dos dados	51
4.2.2 Parâmetros do problema	56
5 – ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	60
5.1 Análise otimização mono objetivo	60
5.1.1 FLEET-ICt - Modelo Determinístico	61
5.1.2 LR-MEXCLP-ICt - Modelo Estocástico	63

5.2	Análise Multiobjetivo	66
5.3	Análise por meio da Simulação	68
5.4	Análise e discussão	73
6	– CONSIDERAÇÕES FINAIS	76
	Referências	78
	Apêndices	89
	APÊNDICE A – Modelos de localização aplicados em EMSs	90

1 INTRODUÇÃO

O Serviço Médico de Emergência, do inglês *Emergency Medical Service* (EMS), é um componente importante dos sistemas de saúde. Sua função é fornecer atendimento às demandas emergenciais da população por serviços de primeiros socorros, transporte de vítimas ou transferência de pacientes entre hospitais. Alguns fatores são fundamentais para que o atendimento às vítimas que demandam por este serviço seja bem-sucedido: a detecção da condição do paciente deve ser imediata, o chamado precisa ser realizado o mais breve possível e o EMS deve responder com agilidade. Além disso, os primeiros socorros devem ser eficazes, o transporte deve ser realizado cuidadosamente, e a vítima deve ser conduzida para o hospital adequado (ARINGHIERI; CARELLO; MORALE, 2016). Todos esses fatores devem ser gerenciados para que se garanta às vítimas um atendimento com qualidade satisfatória.

Diretamente relacionado a agilidade do EMS para responder aos chamados emergenciais, o tempo de resposta é o intervalo de tempo entre o recebimento de um chamado e a chegada da ambulância ao local do incidente, sendo esse um dos indicadores mais críticos para o EMS, especialmente em casos de emergências com risco de vida (ABOUELJINANE; SAHIN; JEMAI, 2013). A importância do tempo de resposta fica evidente uma vez que esse indicador pode influenciar diretamente nas taxas de morbidade e mortalidade dos dependentes dos serviços médicos de emergência. Por isso, é fundamental que as ambulâncias sejam instaladas em locais que as possibilitem cobrir adequadamente às suas demandas, de forma que seja possível acessar cada uma delas dentro de um intervalo de tempo suficiente.

Por isso, os gestores dos EMSs devem estar atentos quanto a localização das bases de ambulâncias e a alocação dos veículos nas bases, a fim de oferecer cobertura efetiva às possíveis demandas pelo serviço. Tratam-se de decisões importantes, que podem significar em melhoria no nível de serviço à população, e também, em uma melhor gestão em relação aos custos e orçamentos operacionais. Neste sentido, para auxiliar o processo de tomada de decisão neste campo, a Pesquisa Operacional (PO) oferece um conjunto de ferramentas e métodos como a Otimização, a Simulação e a Teoria das Filas, com o objetivo de aprimorar o desempenho desses EMSs, tentando auxiliar na busca por locais ideais para instalação de bases e alocação de ambulâncias (ANDERSSON; VÄRBRAND, 2007; ABOUELJINANE; SAHIN; JEMAI, 2013).

A configuração de operação dos EMSs é normalmente caracterizada pela instalação de veículos em bases fixas e, dessa forma, a quantidade de ambulâncias e o seu posicionamento entre as bases são fatores vitais para a qualidade do serviço (AFSHARI;

PENG, 2014). Por isso, a localização adequada de bases e ambulâncias pode possibilitar que ocorrências emergenciais sejam atendidas dentro de padrões de tempo de resposta satisfatórios e também garantir cobertura ao máximo de demanda possível. Para isso, a Programação Matemática oferece uma série de métodos e modelos capazes de tratar este problema, podendo auxiliar o processo decisório por meio de alternativas otimizadas de localização para os EMSs. Segundo Lieberman e Hillier (1995), a abordagem da Programação Matemática baseia-se na construção de modelos matemáticos para representar o problema de interesse. Tal modelo deve incluir as variáveis que retratam as decisões a serem tomadas e inequações (ou equações) para reproduzir as restrições relacionadas às variáveis de decisão. Através desta técnica de otimização é possível levar em conta o importante fato que todo EMS tem suas limitações em relação ao número de ambulâncias (e/ou equipes de resgate, instalações) e por isso as decisões devem ser feitas com equilíbrio entre os recursos e os objetivos propostos (ALSALLOUM; RAND, 2006).

Outra técnica bastante empregada em estudos sobre EMSs, particularmente em estudos sobre a localização de bases e ambulâncias, é a Simulação. Através dessa técnica é possível imitar o comportamento dos sistemas reais a medida em que evoluem ao longo do tempo para que inferências sobre características operacionais possam ser extraídas. Tais inferências podem servir de suporte e auxiliar o processo decisório. De acordo com Banks et al. (2013), a Simulação consiste em gerar uma história artificial através de um modelo que assume a forma de um conjunto de suposições relativas a operação do sistema real. Tais suposições são expressas por relações matemáticas, lógicas e simbólicas entre os objetos de interesse do sistema. A Simulação é um método de experimentos que permite a identificação de problemas, gargalos, déficits de projeto, comparações entre configurações alternativas e entre diferentes regras de operação antes da construção ou modificação de um sistema real (CARSON; JOHN, 2005).

Além disso, a Programação Matemática e a Simulação podem também ser empregadas de forma conjunta, assim como indicam alguns exemplos na literatura (LAM et al., 2015; LEKNES et al., 2017; ENAYATI et al., 2018). Tal combinação se mostra vantajosa uma vez que a Programação Matemática permite o desenvolvimento de políticas ótimas de localização enquanto a Simulação, através da reprodução dos sistemas reais dos EMSs, possibilita que os efeitos das configurações ótimas resultantes sejam testadas.

Neste sentido, a presente pesquisa tem o objetivo de desenvolver modelos de otimização para tratar do problema de localização de bases e alocação e realocação de ambulâncias, de forma a maximizar a cobertura da demanda dentro de tempos de resposta satisfatórios. Este estudo será desenvolvido por meio da combinação entre duas importantes técnicas da PO: a Simulação e a Programação Matemática. Especificamente, propõem-se a formulação e aplicação de modelos de otimização mono-objetivos e multiobjetivos capazes de determinar configurações otimizadas para a localização das bases e ambulâncias

do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) da cidade de Belo Horizonte, considerando o aspecto dinâmico e estocástico do sistema ao longo do dia. Adicionalmente propõem-se a combinação dos modelos de otimização com um modelo de simulação, desenvolvido em paralelo com a presente pesquisa, sob a ótica da Simulação de Eventos Discretos (SED). Tal simulador possibilita que as configurações de funcionamento atuais do SAMU de Belo Horizonte sejam analisadas e comparadas com as configurações de localização propostas pelos modelos de otimização.

1.1 Caracterização do SAMU

No começo dos anos 2000, a atenção às urgências tornou-se prioridade para o governo brasileiro, devido ao enorme desgaste em que se encontravam os serviços hospitalares de urgência naquela época. Por isso, a Política Nacional de Atenção às Urgências foi implantada no Brasil. O SAMU é um dos resultados dessa implantação, e se encaixa ao conceito de EMS (O'DWYER et al., 2017). Inspirado no EMS francês, que também é conhecido como SAMU, o EMS brasileiro presta assistência prévia (pré-atendimento) às vítimas no local do incidente. O serviço é gratuito e opera 24 horas por dia com equipes de profissionais de saúde como médicos, enfermeiros, auxiliares de enfermagem e socorristas que atendem às urgências de natureza traumática, clínica, pediátrica, cirúrgica, gineco-obstétrica e de saúde mental da população. O serviço pode ser solicitado por telefone discando o número 192 (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2018).

O SAMU é composto por uma Central de Regulação Médica de Urgências e por bases, distribuídas em pontos das cidades, que comportam os veículos de emergência (ambulâncias, motolâncias, ambulanchas ou aeromédicos). A Central de Regulação recebe chamados de urgência da população e/ou de profissionais de saúde e procura avaliar os chamados de acordo com a gravidade, de forma a atribuir o veículo adequado (mais próximo o possível do local do incidente) para o atendimento das vítimas, seja em domicílio ou em qualquer espaço público (O'DWYER, 2010).

Em relação aos veículos, estima-se que 92% da frota do SAMU brasileiro seja composta por ambulâncias, que são classificadas de duas formas: como ambulâncias básicas, ou USBs (Unidades de Suporte Básico), que são veículos estruturados para garantir os primeiros procedimentos de socorro; e como ambulâncias avançadas, ou USAs (Unidades de Suporte Avançado), que são veículos compostos por Unidades de Terapia Intensiva móveis. Já as bases, devem ser equipadas como ambientes de apoio, possuindo quartos para descanso dos profissionais, copa, sala de estar, banheiros, estacionamento coberto para os veículos e almoxarifado. Essas formalidades se enquadram como composição mínima previstas pelo Ministério da Saúde (2014).

De acordo com a Portaria 2.048 do Ministério da Saúde (2002), as ambulâncias

devem ser adquiridas para cada sistema (cidade) na proporção de 1 USB para um grupo de 100.000 a 150.000 habitantes, e de 1 USA para um grupo de 400.000 a 450.000 habitantes. Com uma população de aproximadamente 2.501.576 habitantes em Belo Horizonte, de acordo com dados do IBGE (2018), o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência de Belo Horizonte (SAMU-BH) deve operar com pelo menos 17 USBs e 6 USAs. De acordo com as informações obtidas no SAMU-BH, em 2019 o serviço contava com 7 USAs e 21 USBs, o que atende as exigências mínimas para o serviço. De acordo com essas configurações, as 28 ambulâncias do SAMU-BH eram alocadas em 25 bases espalhadas pela capital mineira, como detalhado no Quadro 1. Cada base pode receber uma ou mais unidades de um mesmo tipo ou de tipos diferentes.

Quadro 1 – Localização das 25 bases do SAMU-BH em 2019

Id	Endereço das bases	Regional	USAs	USBs
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
5	R. Dom Aristίδes Pôrto, 3 - Coração Eucarístico	Noroeste	1	1
6	R. Dona Luiza, 311 - Milionários	Barreiro	1	-
9	Rua Pastor Muryllo Cassete, 25 - São Bernardo	Norte	-	1
92	R. Piauí, 1815 - Funcionários	Centro Sul	1	-
116	Av. Eng. Carlos Goulart, 900 - Buritis	Oeste	-	1
318	R. Santo Agostinho, 1440 - Horto	Leste	-	1
333	R. Erê, 207 - Prado	Oeste	-	1
405	Rod. Papa João Paulo II, 4143 - Serra Verde	Venda Nova	-	1
411	Av. Amazonas, 3155 - Barroca	Oeste	-	1
635	Av. Otacílio Negrão de Lima, 8000 - Pampulha	Pampulha	-	1
1059	Av. Cristiano Machado, 12001 - Vila Suzano	Norte	1	-
1109	R. Queluzita, 45 - São Paulo	Nordeste	-	1
1110	R. Padre Eustáquio, 1951 - Padre Eustáquio	Noroeste	-	1
1138	Hangar Aeroporto da Pampulha	Pampulha	1	-
1166	R. Formiga, 50 - Lagoinha	Noroeste	1	-
1263	Av. Afonso Pena, 2336 - Funcionários	Centro Sul	-	1
1351	R. Água Marinha, 120 - Candelária	Venda Nova	-	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
1518	R. Padre Pedro Pinto, 175 - São Tomaz	Venda Nova	-	1

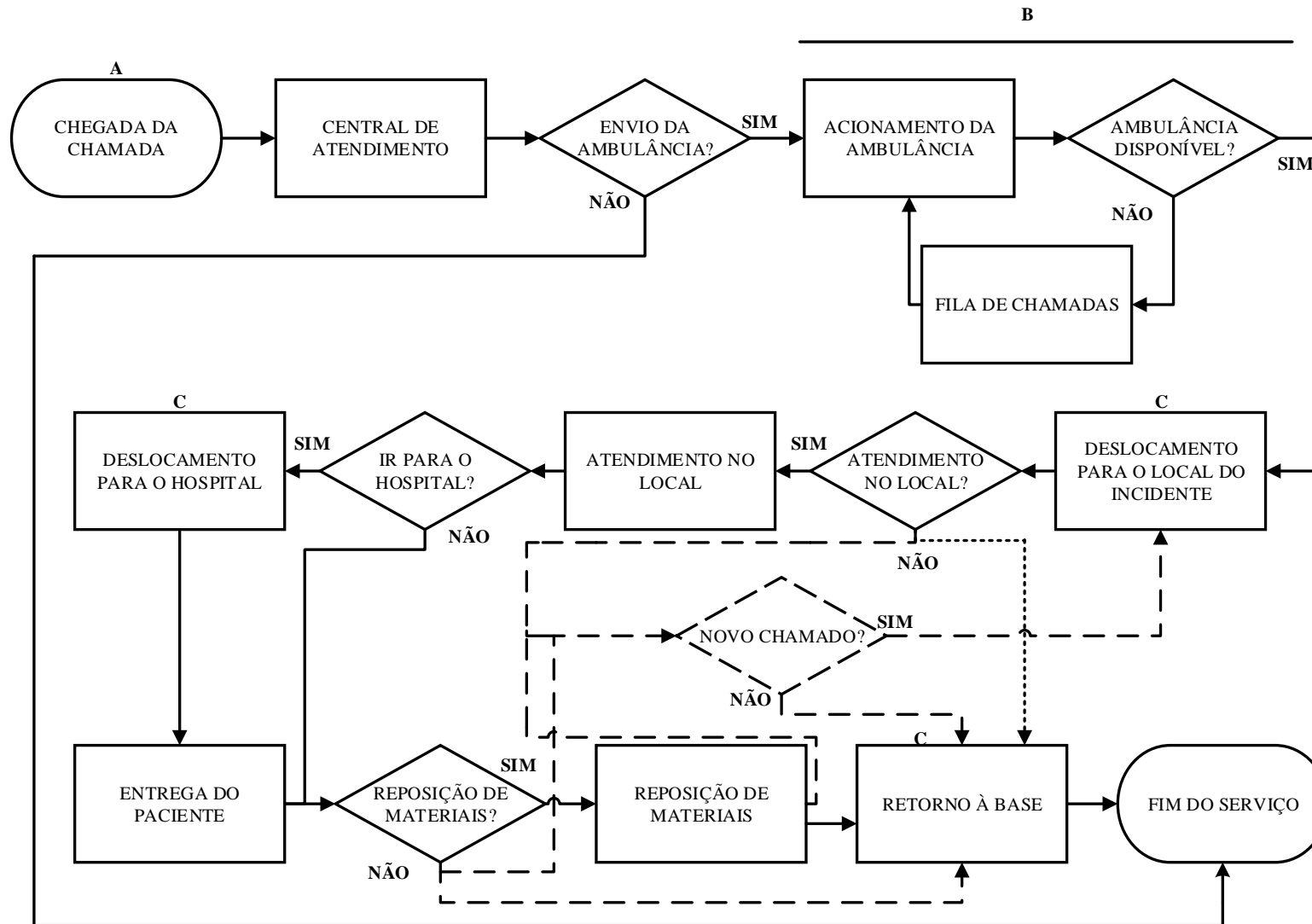
A Figura 1 ilustra o processo de atendimento do SAMU. A combinação entre linhas contínuas e a linha pontilhada representa o modelo de despacho estático. A combinação entre linhas contínuas e tracejadas representa um modelo de despacho dinâmico. Esse processo resulta no despacho de uma ou mais ambulâncias para o atendimento do chamado e modifica o status dos veículos empenhados para 'ocupado (s)'. O critério para a seleção e

despacho da ambulância é orientado por informações coletadas no chamado a respeito da localização da vítima e do grau da ocorrência. Com essas informações pode-se definir entre o despacho de USAs ou USBs e também determinar a base mais próxima do incidente.

Assim que é feita a designação da ambulância para o atendimento da ocorrência, a mesma desloca-se até o local em que a vítima se encontra. Uma vez no local, inicia-se o atendimento médico. Em casos de maior gravidade, após a prestação de primeiros socorros, a vítima é transportada para um hospital. Prioriza-se sempre a seleção do hospital mais próximo, de acordo com a natureza e gravidade do caso.

Após o fim do atendimento, seja com a entrega do paciente a um hospital ou com a liberação no próprio local do incidente, a equipe verifica a necessidade de reposição de materiais ou de manutenção da ambulância. Quando um atendimento ou reposição/manutenção é finalizado, o veículo assume o status de 'desocupado'. Caso exista alguma solicitação em espera, a ambulância parte de onde está e dirige-se ao local do novo incidente (despacho dinâmico), dado que a mesma foi selecionada para atender esta nova ocorrência. Caso contrário, a ambulância retoma sua posição na base em que está alocada, ficando a espera de um novo chamado.

Figura 1 – Representação genérica do atendimento de um EMS



Fonte: Adaptado de Pinto, Silva e Young (2015)

1.2 Justificativa

A função básica do SAMU é responder às situações de urgência médica de forma organizada, evitando assim o uso excessivo de recursos (TAKEDA; WIDMER; MORABITO, 2001). Por isso, ao projetar ou modificar as configurações dos SAMUs, seus gestores devem equilibrar os benefícios entre aumentar a qualidade do serviço ao usuário (com tempo de resposta médio reduzido, maior número de chamados cobertos e melhor qualidade de atendimento) em relação aos custos dos investimentos para aumentar a capacidade do sistema (mais ambulâncias, bases, melhor treinamento de pessoal, melhor triagem dos chamados) (IANNONI; MORABITO; SAYDAM, 2008). Isso torna o processo decisório complexo, de forma que a busca por soluções multiobjetivos deve ser considerada e estas soluções devem ser avaliadas para a tomada de decisão.

O tempo de resposta e a taxa de cobertura (percentual de ocorrências cobertas dentro de um tempo de resposta máximo) são indicadores amplamente considerados para avaliar a qualidade do serviço prestado pelos EMSs à população. Estas medidas são importantes pois estão relacionadas ao objetivo principal dos EMSs, que é salvar vidas. Alguns autores têm levantado discussões sobre o tempo de resposta ideal, que possa ser considerado um *Benchmarking* para os EMSs (PONS; MARKOVCHICK, 2002; PONS et al., 2005; BLACKWELL et al., 2009; AL-SHAQSI, 2010; MCLAY; MAYORGA, 2010; SAYED, 2012; BECKER et al., 2013; WILDE, 2013). Estudando indicadores de desempenho de um EMS, McLay e Mayorga (2010) mostram que tempos de resposta entre 7 e 8 minutos podem maximizar a sobrevivência das vítimas, enquanto tempos de resposta entre 9 e 10 minutos são capazes de gerar efeitos mais equitativos para a população como um todo. Segundo Wilde (2013), o tempo de resposta é um indicador que afeta significativamente a taxa de mortalidade das vítimas socorridas pelos EMSs e o acréscimo de 1 minuto nesse tempo pode aumentar essa taxa de 8 a 17%, sendo as mulheres e as pessoas acima de 65 anos os mais afetados.

Neste sentido, apesar da falta de um tempo de resposta *Benchmarking* que seja consenso, é natural deduzir que quanto maior a espera da vítima por socorro mais a sua condição clínica será degradada. Além disso, os usuários desses serviços não estão dispostos a aceitar serviços de baixa qualidade, seja em relação ao tempo de espera por atendimento ou em relação a assistência prestada (BRAILSFORD; VISSERS, 2011). Entretanto, os SAMUs, assim como outros EMSs, operam com recursos limitados e nem sempre conseguem atender os chamados dentro de tempos de resposta adequados, deixando a população de certa forma vulnerável. Custos de operação crescentes, demanda cada vez maior e o agravamento das condições de tráfego nas metrópoles fazem com que os EMSs enfrentem uma grande pressão para atender às metas de desempenho (ZHEN et al., 2014).

Desde a implantação do SAMU no Brasil, diferentes técnicas da PO têm sido

aplicadas para estudar este EMS. Identifica-se o uso de diferentes abordagens como o Modelo Hipercubo de Filas, a Simulação, a Programação Matemática e heurísticas (Seção 3.1). O objetivo de grande parte desses estudos é contribuir para a redução do tempo de resposta através da análise de diferentes configurações para a localização de bases e ambulâncias.

Em estudos recentes no SAMU-BH, Pinto, Silva e Young (2015) e Nogueira, Pinto e Silva (2016) mostraram através de um modelo de simulação que o tempo de resposta médio, de acordo com os dados analisados, era de 20,33 e 21 minutos, respectivamente. Nessas condições é notável a necessidade de se empenhar esforços para reduzir o tempo de resposta das ambulâncias do SAMU na capital mineira. Para isso, Guimarães (2018) empregou a Programação Matemática e propôs configurações alternativas para a localização estática das bases e ambulâncias, de forma a se alcançar o máximo de cobertura possível dentro de um tempo de resposta máximo de 8 e 10 minutos, dependendo do tipo de ambulância utilizado (USBs e USAs respectivamente).

Dando sequência aos estudos que abordaram o SAMU-BH, a presente pesquisa justifica-se por contribuir para a melhoria da qualidade do serviço, em relação à cobertura dos chamados dentro de tempos de resposta adequados, por meio da aplicação de modelos de otimização que considerem a natureza dinâmica do sistema ao longo do dia (em relação às variações na demanda e à disponibilidade das ambulâncias). Tal abordagem insere ao SAMU-BH os conceitos de cobertura múltipla e de realocação. A ideia de cobertura múltipla visa minimizar os impactos causados pela indisponibilidade dos veículos, garantindo aos pontos cobertos pelos mesmos, uma cobertura extra. Já a realocação confere às ambulâncias mobilidade entre as bases instaladas, permitindo que a cobertura e a utilização dos recursos em um dado período sejam maximizadas ao transferir veículos ociosos, naquele período, para bases capazes de cobrir demandas maiores.

Sob essa ótica, a contribuição desta pesquisa se dá em três vertentes. Primeiramente, pode-se contribuir diretamente a questões sociais, tendo em vista que a redução do tempo de resposta das ambulâncias pode impactar na gravidade da situação de vítimas de incidentes médicos, inclusive salvando a vida desses indivíduos. A segunda vertente refere-se ao âmbito governamental, uma vez que tal pesquisa poderá auxiliar no processo decisório do SAMU-BH, com contribuições à qualidade do serviço e a utilização dos recursos públicos. Por fim, na terceira vertente, tem-se o anseio em acrescentar contribuições científicas aos estudos relacionados a localização de EMSs, de forma que a literatura possa seguir em evolução, orientando pesquisas futuras.

1.3 Problema

Considerando o tempo de resposta das ambulâncias como um importante indicador de qualidade nos EMS e os recursos limitados desses sistemas, o problema desta pesquisa é formulado da seguinte maneira: **Como a aplicação de ferramentas da Pesquisa Operacional podem auxiliar o processo de tomada de decisão do SAMU-BH em relação a localização de bases e alocação de ambulâncias?**

1.4 Objetivo geral e específicos

O objetivo da presente pesquisa é desenvolver modelos de otimização para tratar do problema de localização de bases e alocação e realocação de ambulâncias, de forma a maximizar a cobertura da demanda dentro de tempos de resposta satisfatórios. Para alcançar o objetivo geral desta pesquisa, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Elaborar um modelo de otimização que acrescente características dinâmicas ao sistema (considerando as variações temporais da demanda);
- Propor um segundo modelo de otimização que além de incluir as variações temporais da demanda, trate a indisponibilidade das ambulâncias;
- Testar as diferentes configurações de localização propostas pelos modelos de otimização por meio de um simulador.
- Propor modelos multiobjetivos que consideram os objetivos de maximização da cobertura e minimização do número de bases instaladas.

1.5 Organização do trabalho

Contando com este capítulo introdutório, esta pesquisa é composto por seis capítulos. No Capítulo 2 aborda-se a revisão da literatura cobrindo os temas que dão embasamento para a construção deste trabalho, partindo da PO trazendo duas das suas principais técnicas: a Programação Matemática e a Simulação. O Capítulo 3 traz um resumo de trabalhos que abordaram o problema localização de facilidades em EMSs no Brasil e no mundo. No Capítulo 4, a proposta metodológica a ser seguida é detalhada. Apresenta-se a coleta de dados, a definição dos modelos de otimização e o uso da simulação. O Capítulo 5 traz as análises e os resultados obtidos com a pesquisa. No Capítulo 6 as conclusões e propostas futuras são apontadas. Por fim, são apresentadas as Referências e o Apêndice A.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo são apresentadas as teorias, conceitos e modelos que embasam a presente pesquisa. O empenho da PO na área da saúde é brevemente contextualizado na Seção 2.1. O Problema de Localização de Facilidades é levantado na Seção 2.2. A Seção 2.3 traz a aplicação do Problema de Localização de Facilidades em EMSs. Em seguida, o emprego da otimização multiobjetivo é mostrado na Seção 2.4. Por fim, a Seção 2.5 discorre sobre a Simulação, com foco na SED.

2.1 Pesquisa operacional na área da saúde

Segundo Hulshof et al. (2012), a PO é uma derivação interdisciplinar da Matemática Aplicada, da Engenharia e das Ciências, que utiliza princípios científicos, estratégias e métodos analíticos para aperfeiçoar a tomada de decisões nas organizações. Dentre os métodos analíticos cita-se o uso da Programação Matemática, Simulação, Teoria das Filas, Teoria dos Jogos, dentre outras (TEOW, 2009). Trata-se de um conjunto de métodos aplicáveis a tarefas complexas, como meio de se avaliar o impacto de diferentes cenários e configurações, e que pode fornecer uma melhor fundamentação para a tomada de decisões. Através de suas ferramentas é possível tratar um problema levando-se em conta o conflito entre objetivos, estratégias e possibilidades (PRIYAN, 2017). Conforme Hillier e Lieberman (2013), é uma área que se preocupa com a tomada de decisões e com a modelagem de sistemas reais (como por exemplo governos, empresas, problemas na engenharia, economia e ciências sociais), que necessitam de uma alocação adequada de seus recursos, uma vez que estes normalmente são escassos.

Na área da saúde, a PO tem acrescentado importantes contribuições ao longo dos anos. Como afirmam Brailsford e Vissers (2011), esta área tornou-se um importante tipo de indústria, envolvendo um grande número de pessoas, como funcionários e consumidores. Para controlar as despesas, cada vez maiores, os gestores têm buscado oportunidades de otimizar a utilização dos recursos, que são cada vez mais limitados, com o objetivo de assegurar a qualidade do serviço aos pacientes. Neste sentido, Brandeau, Sainfort e Pierskalla (2005) citam que, para fornecer assistência médica qualificada, dada a limitação dos recursos, os gestores desse campo necessitam de métodos eficazes de planejamento, priorização, tomada de decisões, de gerenciamento e de melhorias.

Por meio de suas metodologias e técnicas de solução de problemas, a PO permite que inúmeros problemas sejam abordados na área da saúde. Priyan (2017) aponta que a PO pode ser aplicada em uma gama de problemas operacionais; na gestão da cadeia

de suprimentos; em estudos sobre localização e *layout* de instalações; na prevenção, detecção e tratamento de doenças; na alocação de recursos; dentre outros. Nesta acepção, segundo Rais e Viana (2011), é possível responder questões do tipo: como decidir sobre as melhores localizações de hospitais e veículos de emergência para fornecer cobertura máxima em assistência médica à determinada população? Quantas bases de ambulâncias são necessárias se a distância total entre esses locais e os hospitais deve ser inferior à determinado limite? Como o tratamento com radiação deve ser planejado para minimizar o tempo de tratamento de pacientes com câncer? Como enfermeiros devem ser posicionados e reposicionados de forma a garantir um nível de serviço adequado, mesmo nos piores cenários?

Em relação às questões sobre a localização de instalações, na área da saúde esse problema é consideravelmente crítico e importante uma vez que decisões inadequadas neste âmbito podem causar sérios danos para determinada população (podendo influenciar, por exemplo, nas taxas de morbidade e mortalidade), além dos custos gerados e de outros fatores que impactam na qualidade do serviço (AHMADI-JAVID; SEYEDI; SYAM, 2017).

Segundo Ahmadi-Javid, Seyedi e Syam (2017), devido a certas tendências globais, como a diminuição das taxas de natalidade, maior longevidade, crescimento da população idosa e aumento dos problemas ambientais (por exemplo, poluição sonora e atmosférica) os cuidados com a saúde têm aumentado ao longo dos anos. A partir desta perspectiva, constata-se que o problema de localização de facilidades tem sido amplamente empregado em serviços de saúde, uma vez que se trata de uma necessidade universal, que deve ser fornecida em todas as regiões de um país, com demanda (aproximadamente) proporcional à população (RAHMAN; SMITH, 1999).

2.2 O Problema da localização de facilidades

Problemas de Localização de Facilidades, conforme Farahani e Hekmatfar (2009), têm o objetivo de alocar um conjunto de facilidades (recursos), de forma que se minimize o custo para satisfazer certas demandas (dos clientes) com relação a algum conjunto de restrições. Daskin (2008) cita o emprego dessa técnica em vários contextos como em EMS, bombeiros, escolas, hospitais, *hubs* para companhias aéreas, locais de depósitos de resíduos, armazéns, reservas para espécies em extinção, dentre outros.

Segundo ReVelle e Eiselt (2005), os problemas de localização são caracterizados por quatro componentes. (i) Clientes; (ii) facilidades que serão instaladas; (iii) o espaço no qual os clientes e instalações estão localizados; e (iv) a distância entre clientes e instalações. A maioria dos problemas de localização pode ser definida da seguinte forma: dado uma determinada área, uma distância é definida entre pares de pontos pertencentes a esta área e clientes localizados nesses pontos geram demanda por produtos/serviços. A tarefa é

localizar uma ou mais instalações nessa área de forma a satisfazer algumas ou todas as demandas dos clientes (EISELT; SANDBLOM, 2013).

São decisões que determinam a capacidade dos sistemas em atender suas demandas de forma eficiente conforme elas evoluem ao longo do tempo (HALE; MOBERG, 2003). Segundo Owen e Daskin (1998), a medida em que as populações aumentam e/ou se modificam, as tendências de mercado evoluem e outros fatores ambientais se alteram, a necessidade de realocar, expandir e adaptar instalações asseguram novos desafios ao planejamento da localização de facilidades.

Neste sentido, localizar facilidades é um elemento crítico no planejamento estratégico de empresas públicas e privadas, pois tratam-se de decisões que influenciam de forma ampla e contínua inúmeras outras decisões a nível operacional e logístico (FARAHANI; HEKMATFAR, 2009). No setor público, por exemplo, os gestores precisam determinar locais para bases de veículos de patrulha, bombeiros e ambulâncias. Nesses casos, é importante levar em conta que locais menos desenvolvidos podem apresentar maior probabilidade de sofrer com danos a propriedade e/ou perda de vidas. Já no setor privado, a indústria deve localizar escritórios, fábricas de produção e montagem, centros de distribuição e lojas de varejo. Decisões equivocadas sobre localização podem gerar custos elevados e conseqüentemente a perda de competitividade. Em suma, o sucesso ou fracasso de entidades do setor público e privado dependem, em parte, dos locais escolhidos para essas instalações (DASKIN, 2011).

Por isso, pesquisadores da PO têm desenvolvido vários modelos, através da Programação Matemática, para representar uma ampla gama de problemas de localização. A Programação Matemática é um método exato aplicável a problemas triviais como em localização de facilidades não-capacitados ou em casos que possuam uma base de dados mais simples. Diversos tipos de função objetivo têm sido formuladas para tornar tais modelos passíveis de inúmeras aplicações (OWEN; DASKIN, 1998). Segundo Daskin (2011) esses modelos são projetados para abordar questões como:

1. Quantas facilidades devem ser instaladas?
2. Onde cada facilidade deve ser localizada?
3. Qual deve ser a capacidade de cada facilidade?
4. Como a demanda pelos serviços deve ser alocado às facilidades?

Ainda segundo Daskin (2011), as respostas a essas perguntas dependem diretamente do contexto e dos objetivos subjacentes a realidade do problema. Para responder a essas questões, os modelos de otimização formulados através de métodos exatos são eficientes e possuem como vantagem a possibilidade do conhecimento da solução ótima. Esses modelos podem ser formulados utilizando variáveis de decisão booleanas (0, 1) para indicar se uma facilidade é ou não é instalada em determinado ponto e/ou se uma demanda é ou não é atendida pelo serviço. Em geral, os modelos são elaborados em Programação

Linear Inteira ou em Programação Linear Inteira Mista.

De acordo com Murray (2010), os problemas e modelos de localização de facilidades podem ser classificados por diferentes critérios e que não há uma única classificação padronizada dentro deste campo. Alguns fatores servem de referência para classificar as abordagens aos vários tipos de problema, são eles:

- Aplicação: setor público ou privado;
- Tipo de serviço: competitivo ou não competitivo;
- Número de facilidades: único ou múltiplo;
- Espaço (facilidade e/ou demanda): discreto, contínuo ou em rede;
- Tempo: período único (estático) ou dinâmico;
- Dados de entrada: estocásticos ou determinísticos;
- Objetivo: *pull* (puxar) ou *push* (empurrar);
- Solução: exata ou heurística.

Dentre as formas de classificação levantadas, destacam-se três, as quais a maioria dos modelos encontrados na literatura se encaixam. Tratam-se dos modelos estáticos, modelos dinâmicos e modelos estocásticos (MOEINI; JEMAI; SAHIN, 2015; BENABDOUALLAH; BOJJI, 2018).

Os modelos estáticos visam otimizar o desempenho do sistema decidindo todas as variáveis uma única vez, nesse caso o espaço (locais de demanda) é o fator mais importante no processo de decisão e leva-se em conta um único período de tempo. Enquanto isso, os modelos dinâmicos consideram diferentes períodos de tempo com variação de dados ao longo desses períodos e assim fornecem soluções para cada período de acordo com suas diferentes condições (DASKIN, 2011).

Já os modelos de localização estocásticos capturam a complexidade inerente a problemas reais através de distribuições de probabilidade de variáveis aleatórias ou considerando um conjunto de possíveis cenários futuros para parâmetros incertos (JIA; ORDÓÑEZ; DESSOUKY, 2007). Em contraste, os modelos determinísticos utilizam parâmetros previstos dentro de valores específicos e, portanto, os problemas são simplificados e apresentam soluções mais simples e rápidas.

2.3 Localização de Facilidades em Serviços de Emergência

Atender a chamados de emergência de forma rápida e otimizada é uma tarefa complexa, o que confere aos EMSs um grande desafio. Segundo Berlin e Liebman (1974), a localização adequada de ambulâncias é essencial para fornecer um serviço eficaz com o mínimo de investimento de capital e de custos operacionais. Em concordância, Ünlüyurt e Tunçer (2016) reiteram que localizar um EMS de maneira eficiente pode contribuir significati-

vamente na redução do número de fatalidades, deficiências e custos financeiros causados por incidentes médicos.

Neste sentido, percebe-se que localizar efetivamente facilidades de EMSs torna-se uma tarefa importante para os gestores desses sistemas. De acordo com Kergosien et al. (2014), são três objetivos comuns ao se empregar estratégias de localização em EMS:

- Minimizar o tempo médio de resposta às necessidades dos pacientes;
- Minimizar o tempo máximo de resposta às necessidades dos pacientes;
- Maximizar o número de regiões cobertas dentro de um tempo de resposta predefinido.

Para atender esses objetivos, os gestores de EMSs enfrentam dois problemas logísticos: quais locais devem ser selecionados para as instalações de bases e quantas ambulâncias devem ser alocadas em cada base, dados os pontos de demanda existentes e n possíveis locais para as instalações de bases (LI et al., 2011). Em concordância, Kergosien et al. (2015) afirmam que o problema da localização de facilidades em EMSs consiste em estabelecer locais apropriados para a instalação de bases e determinar quantas ambulâncias devem ser alocadas a cada uma das bases, a fim de garantir cobertura adequada à população. Ainda segundo os mesmos autores, para considerar a evolução do sistema ao longo do dia e manter um nível de serviço satisfatório, as ambulâncias podem se movimentar entre bases. Essa consideração pode ser tratada como o problema de realocação de ambulâncias e acrescenta características dinâmicas ao problema. A presente pesquisa dedica-se tanto ao problema de localização (e alocação) quanto ao problema de realocação de ambulâncias.

De acordo com o tipo de objetivo a ser otimizado os modelos de localização aplicados em EMS podem ser classificados em três grupos: (i) modelos de p -mediana (*p-median models*) que têm o objetivo de minimizar a distância (total ou média) do serviço (p -facilidades) para todos os clientes (pontos de demanda); (ii) modelos de p -central (*p-center models*) que visam minimizar a distância máxima de serviço para cada pontos de demanda; e (iii) modelos de cobertura (*covering models*) que buscam garantir cobertura para demandas dentro de um padrão de distância predefinido (JIA; ORDÓÑEZ; DESSOUKY, 2007; DANTRAKUL; LIKASIRI; PONGVUTHITHUM, 2014; GHOLAMI-ZANJANI; PISHVAEE; TORABI, 2018). Os três tipos de modelos citados, segundo Ahmadi-Javid, Seyedi e Syam (2017), assumem que todos os pontos de demanda devem estar dentro de uma distância de cobertura específica (em distância ou tempo) das facilidades para serem considerados cobertos pelo serviço, ou seja, para serem atendidos satisfatoriamente.

Introduzido por Hakimi (1964) com vistas a garantir maior acessibilidade e eficácia às facilidades, o modelo p -mediana (*p-median model*) tem o objetivo de minimizar a distância média (total) entre as facilidades e os pontos de demanda, determinando a localização de p instalações. Segundo Revelle, Eiselt e Daskin (2008), decide-se aonde localizar as p facilidades e qual instalação deve atender cada nó de demanda. Esse tipo de modelo é

conveniente para problemas em que a proximidade entre serviço e demanda é desejável, como para supermercados, correios, bem como serviços de emergência (JIA; ORDÓÑEZ; DESSOUKY, 2007).

O modelo p -central (*p-center model*), de acordo com Jia, Ordóñez e Dessouky (2007), foi abordado pela primeira vez por James Joseph Sylverster em 1857, em seu trabalho "*A question in the geometry of situation*". Esse tipo de modelo visa minimizar o tempo máximo de resposta (o tempo entre um local de demanda e a ambulância mais próxima) usando um determinado número p de veículos. Tal formulação aborda situações em que é mais importante reduzir a desigualdade entre os clientes (em relação a prestação do serviço) do que estabelecer um desempenho médio para o sistema. O principal objetivo é garantir cobertura de todas as demandas, minimizando os piores desempenhos do sistema, ao passo que também busca-se localizar as p facilidades disponíveis de forma a minimizar a distância de cobertura para as demandas (OWEN; DASKIN, 1998).

Para os modelos de cobertura (*covering models*), atribuem-se as primeiras formulações a Toregas et al. (1971) e Church e ReVelle (1974). Dentre os três grupos de modelos citados, este é o mais utilizado em problemas relacionados a localização de facilidades em EMSs. O objetivo desse tipo de modelo consiste em garantir cobertura para os pontos de demanda, de forma que, um ponto de demanda é considerado coberto somente se uma facilidade estiver disponível para atendê-lo dentro de um limite de distância estabelecido (JIA; ORDÓÑEZ; DESSOUKY, 2007). De modo geral, conforme Arabani e Farahani (2012) nesse tipo de problema cada cliente pode ser atendido por qualquer facilidade do sistema, desde que o cliente e a facilidade estejam localizados dentro da distância máxima estabelecida, tratada como distância de cobertura. Os modelos de cobertura podem tratar dois tipos de objetivo: (i) cobrir toda a demanda com o menor número de facilidades possível ou, (ii) cobrir o maior número possível de demandas com um determinado número de facilidades (EISELT; SANDBLOM, 2013).

A literatura divide os problemas de cobertura em dois tipos: Problemas de Localização para Cobertura de Conjuntos (*Location Set Covering Problem - LSCP*) e Problemas de Localização de Máxima Cobertura (*Maximal Covering Location Problem - MCLP*). Esses modelos serão detalhados a seguir (Subseção 2.3.1 e Subseção 2.3.2).

2.3.1 Problemas de Localização para Cobertura de Conjuntos

Abordando o problema de cobertura através do LSCP, Toregas et al. (1971) introduzem o Modelo de Localização para Cobertura de Conjuntos (*Location Set Covering Model*). O objetivo dessa abordagem é apontar a quantidade mínima de instalações necessárias e sua respectiva localização, de modo que cada ponto de demanda possa ser coberto por uma facilidade dentro de um padrão de distância S (REVELLE et al., 1977). Nesse tipo de aplicação o objetivo é minimizar o número de instalações de modo que a cobertura

total do sistema seja alcançada (OWEN; DASKIN, 1998). Uma análise rápida das soluções fornecidas por esse modelo normalmente mostra que é possível cobrir um percentual significativo da demanda com um número razoável de instalações e, que, somente instalando um número alto de facilidades, a cobertura total do sistema pode ser alcançada (GARCÍA; MARÍN, 2015).

Conforme modelo apresentado por Toregas et al. (1971), I é o conjunto de nós de demanda e J é o conjunto de pontos onde é possível instalar uma facilidade. A distância entre um par de nós i e j é dada por d_{ij} e o valor crítico de cobertura por S (em distância). Quando $d_{ij} \leq S$, define-se o conjunto N_i , de forma que os componentes deste grupo são todos os pontos $j \in J$ que estão dentro do limite de cobertura (S) para cada nó de demanda i . A variável do problema, x_j , é binária e assume valor 1 se for instalada uma facilidade no ponto j e 0, caso contrário.

$$\text{Minimizar } \sum_{j \in J} x_j \quad (1)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i} x_j \geq 1, \quad \forall i \in I, \quad (2)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J. \quad (3)$$

A função objetivo (1) minimiza o número total de facilidades instaladas. A restrição (2) indica o requisito de cobertura para todos os nós de demanda i , enquanto a restrição (3) estabelece a integralidade da variável.

Neste caso, o modelo tende a optar por candidatos à instalação que sejam capazes de cobrir um grande número de pontos de demanda. Isso é mais eficiente do que selecionar candidatos que sejam qualificados a cobrir poucos pontos de demanda (REVELLE et al., 1977).

Modelos posteriores também se basearam na abordagem do LSCP. Cita-se por exemplo o modelo de Localização de Cobertura Dinâmica Disponível (*Dynamic Available Coverage Location*) de Rajagopalan, Saydam e Xiao (2008), o Modelo de Confiabilidade (*Reliability Model*) de Ball e Lin (1993) e o Problema de Localização para Cobertura de Conjuntos Probabilístico em Filas (*Queueing Probabilistic Location Set Covering Problem*) de Marianov e Revelle (1994). Porém, como o foco deste trabalho está nos MCLPs, estes receberão mais atenção e serão mais detalhados.

2.3.2 Problemas de Localização de Máxima Cobertura

Por buscar o menor número de instalações possíveis para cobrir todos os pontos de demanda, a abordagem baseada no LSCP possui limitações práticas, uma vez que, para

garantir a cobertura total do sistema pode ser necessário um grande número de recursos. Reconhecendo essas limitações, Church e ReVelle (1974) apresentam uma abordagem que não determina que todas as demandas devem ser cobertas, mas que procura maximizar a cobertura total. Neste sentido, a abordagem embasada no MCLP tem o objetivo maximizar a população (demanda) coberta dentro de um padrão de serviço S , dado um número limitado de recursos. De acordo com McLay e Mayorga (2010), essa forma de tratar o problema é muito importante para os estudos na área, uma vez que muitos modelos de localização em EMSs procedem do MCLP.

A formulação do modelo MCLP, apresentada por Church e ReVelle (1974), define o conjunto de nós de demanda I e o conjunto de candidatos a instalação de facilidades J . A população que deve ser coberta em cada nó de demanda é definida por d_i , enquanto P indica o número de facilidades a serem instaladas. Assim como no modelo anterior, a distância entre um par de nós i e j é dada por d_{ij} e o valor crítico de cobertura por S . Define-se o conjunto N_i de forma que os componentes deste grupo são todos os pontos $j \in J$ que estão dentro do limite de cobertura (S) para cada nó de demanda i ($d_{ij} \leq S$). Duas variáveis binárias são empregadas, x_j assume valor 1 se for instalada uma facilidade no ponto j e 0, caso contrário; e y_i assume valor 1 se e somente se o vértice i for coberto por pelo menos uma facilidade e 0, caso contrário.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} d_i y_i \quad (4)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i, \quad \forall i \in I, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P, \quad (6)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (7)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I. \quad (8)$$

A função objetivo (4) maximiza a demanda coberta pelas facilidades. A restrição (5) assegura que para uma demanda ser considerada coberta pelo menos uma facilidade deve ser instalada em um ponto j capaz de cobri-la dentro do padrão S de cobertura. A restrição (6) refere-se a limitação do sistema quanto ao número de instalações possíveis. As restrições (7) e (8) garantem a integralidade das variáveis.

Quando o número P de instalações é aumentado a ponto de que 100% da demanda seja coberta pelo MCLP, seu valor é o mesmo que o P mínimo indicado pelo Modelo de Localização de Cobertura de Conjuntos, entretanto a localização das instalações nos dois modelos não são necessariamente as mesmas (REVELLE et al., 1977).

Apesar da sua aplicabilidade, o modelo MCLP também possui suas limitações, já que

considera definições muito restritas e genéricas para o problema (BROTCORNE; LAPORTE; SEMET, 2003). Por exemplo, a aplicação desse modelo leva em conta o uso de apenas um tipo de ambulância, enquanto a maioria dos EMSs operam com dois tipos de veículo desempenhando funções diferentes e com tempos de cobertura distintos. Considerando o uso de mais de um tipo de veículo, Schilling et al. (1979) apresentam o Modelo de Alocação de Equipamentos em Tandem (*Tandem Equipment Allocation Model* - TEAM).

O TEAM tem o objetivo de maximizar a população coberta por dois tipos de facilidades diferentes, onde o número de instalações para cada tipo de facilidade segue suas próprias limitações. Esse modelo foi desenvolvido para aplicação no serviço de bombeiros, que normalmente operam com dois tipos de equipamento. Entretanto, também pode ser relevante no contexto dos serviços de ambulância onde as unidades básicas e avançadas são utilizadas (BROTCORNE; LAPORTE; SEMET, 2003).

Como limitação, o TEAM considera que os dois tipos de equipamento devem sempre ser alocados a uma mesma instalação. No contexto dos EMSs isso significa que a localização das bases e das ambulâncias é feita de maneira conjunta, de modo que sempre que uma base for instalada, automaticamente os dois tipos de ambulâncias considerados devem ser alocados a esta base. Para superar essa limitação, Schilling et al. (1979) propõem no mesmo estudo um outro modelo que permite que os equipamentos sejam posicionados de forma independente. Além disso, esta formulação é capaz de distinguir entre a localização das bases e a alocação dos equipamentos. Tal modelo é conhecido como *Facility Location and Equipment Emplacement Technique* (FLEET).

Os métodos de abordagem ao problema de localização em EMSs até aqui apresentados são determinísticos e assumem que as ambulâncias estão sempre disponíveis quando solicitadas, o que não corresponde com o funcionamento de um EMS real. Devido a congestionamentos no sistema, ambulâncias localizadas dentro da distância crítica para um dado ponto de demanda podem ficar indisponíveis e deixar esse ponto sem a cobertura adequada (GALVAO; MORABITO, 2008). Dessa forma, pode ser necessário mais de uma ambulância cobrindo um ponto de demanda para que o mesmo possa ser atendido satisfatoriamente. Nesse sentido, segundo Li et al. (2011), duas abordagens surgiram para minimizar esse problema e, através delas, uma série de modelos foram formulados.

O primeiro método a ser destacado traz o conceito de cobertura múltipla, isto é, os pontos de demanda devem ser cobertos por mais de uma ambulância para minimizar o impacto de possíveis indisponibilidades em um ou mais veículos. São exemplos desse tipo de abordagem o Problema de Cobertura Substituta (do inglês *Backup Coverage Problem*) de Hogan e ReVelle (1986) e o Modelo de Padrão Duplo (do inglês *Double Standard Model* - DSM) introduzido por Gendreau, Laporte e Semet (1997). A outra abordagem consiste em atribuir probabilidade de ocupação às ambulâncias e confiabilidade às bases. Dessa forma, dada a probabilidade de um veículo estar ocupado durante o recebimento de um

chamado, uma base pode necessitar que mais de uma ambulância seja alocada a ela para que a região sob o seu atendimento esteja coberta dentro de um nível de confiança satisfatório. Exemplos clássicos desse tipo de aplicação são o Problema de Localização de Máxima Cobertura Esperada (*Maximum Expected Covering Location Problem* - MEXCLP) e o Problema de Localização de Disponibilidade Máxima (*Maximum Availability Location Problem* - MALP), propostos por Daskin (1983) e ReVelle e Hogan (1989), respectivamente.

O DSM, de acordo com Gendreau, Laporte e Semet (1997), tem como objetivo instalar bases em locais capacitados para fornecer cobertura a toda população dentro de um padrão distância S_2 , enquanto uma fração da população deve ser coberta dentro de um padrão de distância menor, S_1 ($S_2 \geq S_1$). De forma geral, procura-se maximizar a cobertura dupla dentro de um padrão de tempo de S_1 , empregando um número de P ambulâncias, com no máximo P_j ambulâncias em cada instalação, e sujeito às restrições de cobertura dupla (BROTCORNE; LAPORTE; SEMET, 2003).

Já o modelo probabilístico MEXCLP assume que cada ambulância tem a mesma probabilidade q , denominada fração de ocupação, de estar indisponível para atender uma ocorrência. Além disso, todas as ambulâncias são consideradas independentes. A fração de ocupação que é utilizada nesse modelo pode ser calculada dividindo-se a estimativa da duração total do atendimento às ocorrências em todos os pontos de demanda pelo número total de ambulâncias do sistema, ou seja, a razão entre a demanda total e a capacidade total de ambulâncias em horas (BROTCORNE; LAPORTE; SEMET, 2003).

Apesar da capacidade de planejar a localização de EMSs com certa eficácia, os modelos apresentados são estáticos e ignoram o aspecto dinâmico dos sistemas reais. Nesses modelos, uma vez que a variável indica o ponto de instalação de uma base (e alocação dos veículos) esta se mantém de forma estática no local designado e sempre que uma ambulância finaliza um atendimento a mesma deve retornar ao seu ponto de origem. Segundo Saydam et al. (2013), como a demanda pelo serviço varia espacial e temporalmente tanto entre os dias da semana como entre os períodos do dia, instalar bases fixas desta forma pode ser ineficaz. Por exemplo, certo ponto de demanda pode gerar um alto número de chamados em um dado período do dia, porém, durante os demais períodos o número de chamados deste mesmo ponto pode ser consideravelmente menor (ou até nulo). Uma vez que as demandas pelos EMSs variam no âmbito espacial e temporal, facilidades ociosas podem migrar para áreas com maior demanda para possibilitar maior cobertura dos chamados (LI et al., 2011; BÉLANGER; RUIZ; SORIANO, 2018).

Neste sentido, os modelos que consideram possíveis movimentos das ambulâncias entre bases despontam como forma de superar a limitação dos modelos estáticos. Esses modelos inserem em sua formulação o índice de tempo t , que passa a tratar as variáveis de acordo com as oscilações temporais do sistema. Tal formulação adiciona ao problema o conceito de realocação, que pode ser interpretado como a movimentação de ambulâncias

entre bases de forma a minimizar os efeitos das flutuações na demanda (ZHI; KESKIN; MELOUK, 2015). Segundo Enayati et al. (2018) a realocação de ambulâncias confere aos modelos características dinâmicas, e além disso sugerem uma reconfiguração de localização ao final de algum horizonte temporal ou em tempo real. Neste sentido, a literatura apresenta dois tipos de estratégias utilizadas para realocar ambulâncias: (i) Multiperíodo e (ii) Tempo Real.

Em estratégias multiperíodo, divide-se um dia em vários períodos de tempo e, entre esses períodos considera-se a variação na demanda em cada ponto. Diferentes planos de localização são estabelecidos para cada período de tempo e os veículos se movem entre os períodos para cumprir o plano de localização do período seguinte. Neste tipo de aplicação assume-se que após a conclusão de uma missão as ambulâncias devem ir para a base as quais foram designadas no período corrente (BÉLANGER; RUIZ; SORIANO, 2018). Já as estratégias de realocação em tempo real tratam as evoluções e variações do sistema de forma ainda mais dinâmica, sendo as realocações dependentes do estado atualizado do sistema. Sempre que uma ou mais ambulâncias são despachadas para atender uma ocorrência ou finalizam um atendimento, o modelo de otimização deve ser executado para definir a alocação/realocação dos veículos que estiverem disponíveis, de forma a garantir que o nível de serviço continue adequado (BÉLANGER; RUIZ; SORIANO, 2018).

Uma das primeiras aplicações da estratégia multiperíodo é atribuída a Repede e Bernardo (1994), que apresentam a aplicação do MEXCLP multiperíodo, o TIMEXCLP. Os autores utilizam os conceitos probabilísticos apresentadas no modelo MEXCLP e ainda inserem ao modelo considerações relativas às variações temporais na demanda, no número de ambulâncias disponíveis e na velocidade dos veículos.

Porém, conforme Bélanger et al. (2016) embora os modelos multiperíodo consigam representar satisfatoriamente o que acontece nos sistemas reais, eles não consideram explicitamente as mudanças de estado do sistema resultantes dos despachos das ambulâncias ou do término dos atendimentos. De acordo com Li et al. (2011), como esses modelos fazem as revisões em pontos de tempo predefinidos, qualquer mudança que ocorra entre dois pontos de tempo consecutivos torna o modelo inconsistente com a configuração dinâmica do sistema. Esta limitação pode ser superada através da estratégia dinâmica para realocar as ambulâncias em tempo real.

Baseados no DSM, Gendreau, Laporte e Semet (2001) apresentam o que pode ser considerado a primeira formulação a tratar das variações dos EMSs em tempo real, esse modelo é conhecido como Problema de Realocação (*Redeployment Problem* - RP^t) ou Modelo Dinâmico de Padrão Duplo (*Dynamic Double Standard Model*). O objetivo do RP^t é, em tempo real e com uma abordagem multiobjetivo, maximizar os pontos de demanda que recebem cobertura dupla e minimizar os custos associados às trocas de bases. Para tratar dos custos de realocação a formulação inclui penalizações para evitar (GENDREAU;

LAPORTE; SEMET, 2001):

1. Realocações repetidas com a mesma ambulância;
2. Transferências de ambulâncias para bases distantes; e
3. Repetidas trocas de ambulâncias entre duas bases.

Sempre que uma ambulância é enviada para atender um chamado o RP^t deve ser executado. Segundo Gendreau, Laporte e Semet (2006), uma desvantagem dessa formulação é a necessidade de se resolver o modelo sempre que um veículo fica indisponível. Mas nesse caso, como já haviam afirmado Brotcorne, Laporte e Semet (2003), o desenvolvimento de heurísticas mais ágeis e tecnologias mais avançadas na computação têm possibilitado uma resolução mais rápida dos problemas de localização de ambulâncias em tempo real.

A literatura para modelos com abordagem baseada no MCLP é vasta, por isso é importante mencionar que além daqueles mencionados nesta subseção (MCLP, TEAM, FLEET, DSM, Problema de Cobertura Substituta, MEXCLP, MALP, TIMEXCLP e RP^t), outras tantas referências merecem destaque. Cita-se como exemplo o MCLP Múltiplo (*Maximal-Multiple Location Covering Problem*) de Storbeck (1982), o MEXCLP Ajustado (*Adjusted MEXCLP*) de Batta, Dolan e Krishnamurthy (1989), o FLEET Probabilístico (*Probabilistic FLEET*) de ReVelle e Marianov (1991), o MALP em Filas (*Queueing MALP*) de Marianov e ReVelle (1996), o Problema de Máxima Cobertura Esperada com Realocação (*Maximal Expected Coverage Relocation Problem*) de Gendreau, Laporte e Semet (2006), o MEXCLP-DSM de Chuang e Lin (2007), o MEXCLP com Confiabilidade Local (*Local Reliability MEXCLP*) de Sorensen e Church (2010) e o MEXCLP Dinâmico (*Dynamic MEXCLP*) de Jagtenberg, Bhulai e Mei (2015).

A formulação dos modelos referenciados nesta subseção é apresentada no Apêndice A. Para uma visão mais completa sobre os trabalhos citados e outras importantes referências da literatura para a área, os trabalhos de Brotcorne, Laporte e Semet (2003), Jia, Ordóñez e Dessouky (2007), Li et al. (2011), Başar, Çatay e Ünlüyurt (2012), Ahmadi-Javid, Seyedi e Syam (2017), Benabdouallah e Bojji (2018) e Bélanger, Ruiz e Soriano (2019) são indicados. Além disso, no Capítulo 3 (Trabalhos Relacionados), alguns estudos recentes que empregaram modelos em Programação Matemática para o problema de localização em EMSs serão mencionados.

2.4 Otimização Multiobjetivo

Problemas no mundo real são inerentemente compostos por vários critérios que podem ser otimizados. Esses diferentes critérios compõem funções objetivo que são, na maioria das vezes, conflitantes. Tais problemas, muitas vezes, têm múltiplas dimensões ao longo das quais uma solução deve ser analisada, como por exemplo custos e tempo,

produtividade e atrasos, necessidade e disponibilidade, cobertura e número de recursos, dentre outros. A formulação apresentada em (9) - (13) representa um problema multiobjetivo (JÚNIOR, 2011):

$$\text{Maximizar } z = f(x) = \{f_1(x), f_2(x), \dots, f_{OB}(x)\} \quad (9)$$

$$\text{sujeito a: } g(x) = \{g_1(x), g_2(x), g_3(x), \dots, g_r(x)\} \geq 0, \quad (10)$$

$$h(x) = \{h_1(x), h_2(x), h_3(x), \dots, h_r(x)\} = 0, \quad (11)$$

$$x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \in X, \quad (12)$$

$$z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_r) \in Z. \quad (13)$$

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 de objetivos.

Como afirmam Lobato e Steffen (2017), em vários casos, soluções extremas não são capazes de satisfazer todas as funções objetivo e a solução ótima para um dos objetivos não será necessariamente a melhor solução para o(s) outro(s). Neste sentido, é possível compreender que diferentes soluções podem produzir *trade-offs* entre os diferentes objetivos e assim é necessário um conjunto de soluções para representar as soluções ótimas para um problema multiobjetivo.

Takahashi (2011) explica que problemas de otimização multiobjetivo são definidos com base na análise de um conjunto de soluções que levam em conta simultaneamente vários objetivos. Essas soluções, conhecidas como Curva Pareto ou soluções não dominadas, são as melhores soluções possíveis e não há como definir que dentre essas soluções uma é melhor do que qualquer outra. Essa definição baseia-se na premissa de que uma solução é considerada ótima se não for possível encontrar uma outra solução viável em que um dos objetivos é melhorado sem piorar pelo menos um dos outros objetivos.

Conforme detalhado por Deb (2001), o espaço de soluções viáveis contém não apenas o conjunto de soluções Pareto, mas também soluções não ótimas (porém viáveis). Sendo assim, existem muitas soluções no espaço de soluções as quais são dominadas por pelo menos uma solução pertencente ao conjunto Pareto. Neste sentido, é importante que se entenda que, uma solução $x^* \in X$ é uma solução não dominada se não houver nenhuma outra solução $x \in X$ que seja melhor (para um problema de maximização $f(x^*) \geq f(x)$). Se x^1 e x^2 são soluções viáveis $\in X$ e $f(x^1) \geq f(x^2)$ afirma-se que x^1 domina x^2 e que $f(x^1)$ domina $f(x^2)$ (EHRGOTT, 2005).

Para a resolução de problemas multiobjetivo formas indiretas de otimização convencionais (mono-objetivo) podem ser aplicadas, com o auxílio de métodos de escalarização (ZAREPISHEH; KHORRAM; PARDALOS, 2014). Em geral, escalarizar significa substituir um problema de otimização vetorial por um problema de otimização escalar, que é um problema de otimização com uma única função objetivo (ZAREPISHEH; KHORRAM; PARDALOS, 2014). Sendo assim, conforme cita Emmerich e Deutz (2018), as funções objetivo devem ser agregadas (ou reformuladas como restrições), e então um problema mono-objetivo é resolvido, possibilitando a obtenção dos pontos da Curva de Pareto. Alguns métodos de escalarização bastante difundidos são:

- Problema das somas ponderadas;
- Problema ϵ -restrito;
- Abordagem híbrida: Ponderado e Restrito;
- Programação Alvo;
- Abordagem *Goal Attainment*.

Ao se empregar tais técnicas, como frisa Emmerich e Deutz (2018), certas ressalvas devem ser consideradas. Deve-se sempre fazer as seguintes perguntas:

1. A aplicação da técnica de escalarização escolhida gera pontos (soluções) eficientes?
2. É possível obter todos os pontos da Curva de Pareto, alterando os parâmetros da técnica de escalarização ou das restrições?

2.4.1 Método de escalarização Problema ϵ -Restrito (P_ϵ)

A escalarização via abordagem P_ϵ , introduzida por YV, Lasdon e Wismer (1971), é uma metodologia bastante difundida pois trata-se de uma aplicação considerada intuitiva e além disso os parâmetros são simples de serem interpretados, podendo ser representados como limitantes do problema (DEB, 2001). A aplicação consiste em escolher um objetivo para ser otimizado e transformar os demais objetivos em restrições. Para qualquer valor arbitrário de $k \in \{1, \dots, m\}$ e parâmetros $\epsilon_i \in \mathbf{R}$, $i \in \{1, \dots, m\}$, o método de escalarização P_ϵ para um problema de maximização é representado conforme (14) - (17):

$$\text{Maximizar } f_k(x) \quad (14)$$

$$\text{sujeito a: } f_i(x) \leq \epsilon_i \quad i \in \{1, \dots, m\}, \quad (15)$$

$$x \geq 0, \quad (16)$$

$$x \in X. \quad (17)$$

Takahashi (2011) descreve a aplicação do método P_ϵ em três etapas:

1. Encontram-se os valores adequados para inicializar o vetor ϵ . Isso é feito resolvendo os m problemas mono-objetivo. Obtêm-se assim os valores f_i^* , que são os ótimos

individuais de cada objetivo (os quais, agregados, compõem o vetor f , correspondente à solução utópica do problema).

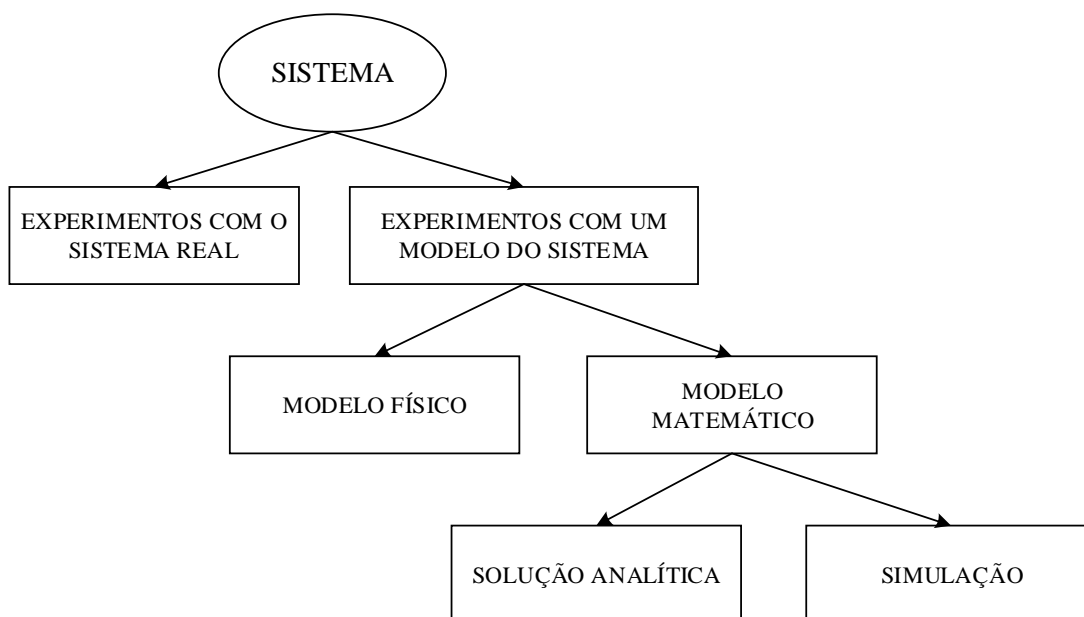
2. Determinam-se os piores valores atingidos por cada objetivo quando um outro objetivo está em seu ótimo, formando o vetor f^o .
3. Resolvem-se os problemas para vetores ϵ resultantes atendendo à restrição (18).

$$f^* \leq \epsilon \leq f^o \quad (18)$$

2.5 Simulação

Uma vez que se deseja estudar um sistema para analisar as relações entre seus vários componentes e/ou para prever o desempenho sob diferentes configurações, é possível fazê-lo através de experimentos com o sistema real ou através de um modelo do sistema. Dada a opção de estudar o sistema através de um modelo representativo, pode-se optar por utilizar um modelo físico (protótipo) ou um modelo matemático (representação em termos lógicos e quantitativos). Uma vez que se decide implementar um modelo matemático, é possível trabalhar soluções exatas e analíticas para casos mais simples. No entanto, em sistemas altamente complexos, é recomendável que o estudo seja realizado por meio da Simulação. A Figura 2 resume o cenário descrito, explicando o percurso ao se optar pelo uso da Simulação.

Figura 2 – Formas para estudar um sistema



Segundo Kelton (2002), a Simulação refere-se a uma coleção de métodos e aplicações que tem o objetivo de imitar o comportamento de sistemas reais, geralmente em um computador, por meio de um *software* apropriado. A Simulação pode ser utilizada para a análise de novos projetos, adaptações para sistemas existentes e propostas de mudanças nas regras de operação (CARSON; JOHN, 2005). Trata-se de uma ferramenta flexível, poderosa e intuitiva que pode ser considerada uma das técnicas mais utilizadas da PO (LAW, 2013; HILLIER; LIEBERMAN, 2013).

A Simulação é uma técnica conveniente para aplicação em sistemas complexos como no serviço militar, em sistemas de comunicação, em redes logísticas, em sistemas produtivos e em sistemas de saúde (ABOUELJINANE; SAHIN; JEMAI, 2013). Na área da saúde, conforme Brailsford et al. (2016), a Simulação é frequentemente utilizada para estudar o corpo humano (e seus processos biológicos), o fluxo de pacientes no sistema de atendimento hospitalar (e seus gargalos), o planejamento estratégico (e as configurações dos sistemas de atendimento).

Conforme Banks et al. (2013), a Simulação consiste na geração de uma “história artificial” de um sistema e por meio disso, busca-se extrair inferências sobre as características operacionais do sistema à medida que o tempo evolui. Isso é feito através de um modelo de simulação, por isso, para entender o conceito de Simulação é importante entender os conceitos de sistema e de modelo. Como relatam Banks et al. (2013), sistemas podem ser definidos como um grupo de objetos arranjados por uma interação regular ou interdependente, para atingir um determinado propósito. Já o modelo, Carson e John (2005) definem como uma representação que pode incorporar aspectos lógicos, matemáticos e estruturais de um sistema ou de um processo.

A construção de um modelo de simulação envolve a estruturação de vários blocos básicos contendo as seguintes configurações (HILLIER; LIEBERMAN, 2013):

- Estado atual do sistema (por exemplo, o número de clientes em fila);
- Conjunto de possíveis estados que o sistema pode assumir;
- Conjunto de possíveis eventos que podem mudar o estado do sistema (por exemplo, chegadas e finalizações de serviço em um sistema de filas);
- Um relógio de simulação para registrar o tempo simulado;
- Um método para gerar eventos aleatoriamente;
- Uma fórmula para identificar transições de estado geradas pelos vários tipos de eventos.

Os modelos de simulação podem ser classificados de acordo com suas diferentes formas de abordagem. Segundo Law (2013), os modelos de simulação devem ser classificados com a seguinte perspectiva:

- Estáticos ou dinâmicos: modelos estáticos são aqueles que representam o sistema

em um momento específico ou aqueles que podem ser utilizados para representar sistemas em que o tempo não é relevante. Já os modelos dinâmicos são aqueles que representam o sistema a medida que o mesmo evolui ao longo do tempo;

- Determinísticos ou estocásticos: modelos determinísticos são aqueles que não contêm variáveis probabilísticas (aleatórios). Já os modelos estocásticos são aqueles que empregam uma ou mais variáveis probabilísticas;
- Contínuos ou discretos: são modelos discretos aqueles em que as variáveis de estado mudam instantaneamente em pontos definidos do tempo. Já os modelos contínuos são aqueles que as variáveis de estado mudam continuamente ao longo do tempo.

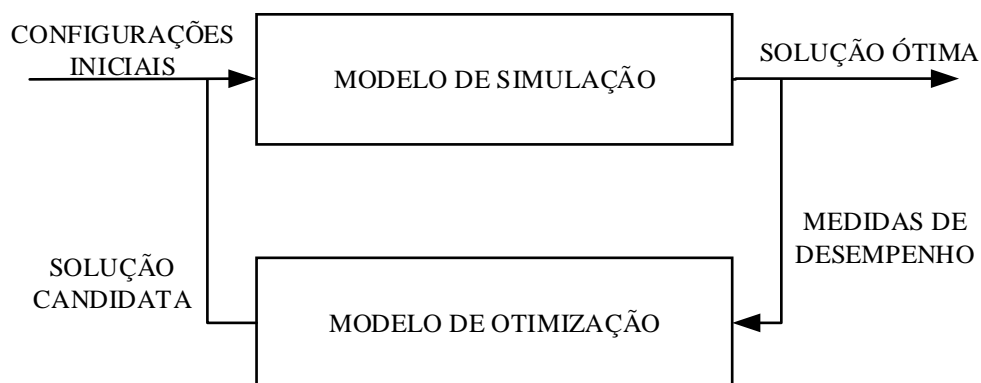
A visão do mundo como um “fluxo de transações” fornece base para a SED, um sistema é visualizado por suas unidades discretas que se movem (fluxo) de um ponto a outro dentro do sistema enquanto competem entre si pelo uso de recursos escassos. Vários sistemas se encaixam na descrição anterior como fábricas, operações, serviços, sistemas de saúde, comunicação e sistemas de processamento de informações, bem como outros sistemas gerais de filas (SCHRIBER; BRUNNER; SMITH, 2014).

Brailsford et al. (2009) cita que por várias décadas a SED tem sido utilizada para analisar problemas no setor de saúde. De acordo com Kergosien et al. (2015), a SED é uma abordagem amplamente utilizada nos estudos em EMSs, permitindo a integração entre os aspectos estocásticos e dinâmicos desses sistemas, seja para testar diferentes estratégias ou para validar/avaliar soluções obtidas pela resolução de modelos de otimização. No mesmo sentido, Lam et al. (2014) afirmam que essa abordagem oferece uma plataforma quantitativa versátil, capaz de fornecer informações objetivas sobre diferentes EMSs sem a necessidade de se impor suposições excessivamente restritivas. Apesar das inúmeras ferramentas aplicadas à resolução de problemas em EMSs, a SED é uma das abordagens mais utilizadas (ABOUELJINANE; SAHIN; JEMAI, 2013).

Segundo Günal e Pidd (2010), os benefícios da SED podem ser significativos para o desenvolvimento de políticas ótimas no gerenciamento de sistemas na área da saúde, principalmente em combinação com métodos analíticos, como a Programação Matemática ou heurísticas. A integração das duas metodologias, como mostra a Figura 3, permite que a partir de um modelo de simulação, configurações ótimas propostas por modelos de otimização sejam testadas e comparadas. A análise dessas configurações, através da Simulação, indica a obtenção de uma solução ótima ou a necessidade de se implementar outras políticas de otimização. Isso aumenta consideravelmente o valor de ambos os métodos e permite que políticas otimizadas prevaleçam (FISHMAN, 2013).

Para as técnicas de otimização, como a Programação Matemática, tal combinação leva à solução de problemas de tomada de decisão em larga escala no mundo real, enquanto que, para a Simulação, implica que sistemas complexos podem ser realisticamente modelados ao ponto de fornecer apoio a decisão operacional e gerencial (FU, 2002). Corro-

Figura 3 – Ilustração de um esquema de integração entre a simulação e a otimização



Fonte: Adaptado de Pinto, Silva e Young (2015)

borando com essa linha, Pinto, Silva e Young (2015) afirmam que para que o modelo de simulação estime as melhores configurações para o sistema, é necessário a implementação de uma estratégia de combinação entre simulação e otimização. No entanto, apesar das vantagens obtidas, Fu et al. (2015) afirmam que a combinação entre essas técnicas é recente, e *softwares* que integram efetivamente simulação e otimização ainda são limitados.

3 TRABALHOS RELACIONADOS

Neste capítulo, estudos relacionados a presente pesquisa são retratados. Os trabalhos apresentados são estudos que tratam da localização de facilidades em EMSs no Brasil e no mundo. Na Seção 3.1, trabalhos que abordaram o problema no contexto brasileiro são exibidos, com indicação das técnicas utilizadas e do local em que foi aplicado. A Seção 3.2 contém estudos recentes, realizados em lugares distintos do mundo, que empregaram a Programação Matemática e/ou a Simulação. Nesta seção, algumas particularidades e características destes estudos serão levantadas.

3.1 Estudos no Brasil

Dada a importância dos EMSs e o alto grau de incerteza de suas características operacionais, é conveniente que estudos sejam conduzidos com o objetivo de melhorar a qualidade do serviço prestado. Devido a grande necessidade por tempos de resposta mais rápidos, vários desses estudos abordaram a localização de ambulâncias com o objetivo de aumentar a taxa de cobertura da população e/ou reduzir o tempo de resposta do serviço. Sabendo que os EMSs são sistemas que operam dentro de certas limitações e que, nem sempre essas limitações podem ser suprimidas, estudos neste sentido são fundamentais, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil. Nesse tipo de cenário, a utilização de recursos, normalmente escassos, pode ser significativamente impactada com o emprego de estratégias e técnicas de otimização.

Nesse sentido, nos últimos anos, estudos com aplicações em problemas do contexto brasileiro têm sido frequentes. Dentre esses estudos cita-se o emprego de técnicas como o Modelo Hiper-cubo, a Programação Matemática, a Simulação, métodos não-exatos de resolução (heurísticas) e técnicas de Geoprocessamento.

A maioria desses trabalhos empregaram o Modelo Hiper-cubo de Filas. Proposto por Larson (1974), o Modelo Hiper-cubo é uma técnica bastante utilizada para modelar sistemas nos quais os servidores se deslocam até os clientes para prestar um serviço, sendo as demandas geograficamente distribuídas em átomos discretos. Contudo, o Modelo Hiper-cubo não é um modelo de otimização que estabelece configurações otimizadas, trata-se de uma ferramenta analítica e descritiva que fornece uma completa avaliação do desempenho de cada configuração sugerida.

Dentre os trabalhos que empregaram o Modelo Hiper-cubo, destacam-se Takeda, Widmer e Morabito (2001) e Takeda, Widmer e Morabito (2007) que estudaram o SAMU de Campinas/SP, Ghussn e Souza (2016) e Beojone e Souza (2017) que analisaram o

SAMU de Bauru/SP, Souza et al. (2013a), Souza et al. (2013b) e Souza et al. (2015) que examinaram o SAMU de Ribeirão Preto/SP, já Iannoni e Morabito (2006a) traz a aplicação no serviço de ambulâncias em uma rodovia do estado de São Paulo. Nestes estudos, o Modelo Hiper cubo foi empregado com o objetivo de analisar as configurações vigentes e também para que cenários alternativos fossem avaliados. Em alguns casos, os autores ainda utilizaram a SED para comparar os resultados obtidos.

Combinando o Modelo Hiper cubo com técnicas de otimização alguns trabalhos apresentam contribuições relevantes. Cita-se por exemplo, o uso de Algoritmos Genéticos, que têm sua primeira fundamentação atribuída a Holland (1975). Trata-se de uma técnica de busca por soluções otimizadas utilizando algoritmos simples e de fácil implementação. Iannoni e Morabito (2006b) utilizam um Algoritmo Genético para encontrar soluções otimizadas para o seu problema em rodovias. Os autores têm o objetivo de dimensionar (de forma ótima) as áreas de cobertura de cada servidor e empregam o Modelo Hiper cubo para analisar os resultados. Já Iannoni, Morabito e Saydam (2009) apresentam um Algoritmo Genético Híbrido capaz de otimizar o dimensionamento das áreas de cobertura de cada servidor e a localização das bases de ambulâncias. Esse estudo também foi aplicado em rodovias no estado de São Paulo, e utilizou a combinação entre o Modelo Hiper cubo e a SED para análise e validação dos resultados. Outra aplicação interessante através da combinação com o Modelo Hiper cubo é feita por Barreto, Alexandrino e Coelho (2016), em seu estudo no SAMU da cidade de Duque de Caxias/RJ. Os autores empregam dois modelos de otimização em Programação Matemática, o modelo FLEET de Schilling et al. (1979) e o modelo MALP de ReVelle e Hogan (1989), e aplicam o Modelo Hiper cubo para analisar os resultados obtidos.

Mais trabalhos se valeram da Programação Matemática para abordar o problema da localização de ambulâncias. Jardim, Conceição e Carvalho (2004) utilizaram o modelo p-mediana de Hakimi (1964) para otimizar a localização das ambulâncias do SAMU de Belo Horizonte/MG de forma a minimizar a somatória das distâncias entre os servidores e os pontos de demanda. Estudando a localização das ambulâncias do Corpo de Bombeiros da cidade de Catalão/GO, Marques e Queiroz (2015) utilizaram uma derivação do modelo de Localização para Indisponibilidade de Limite Superior (*Upper-Bound Unavailability Location*), proposto por Shariat-Mohaymany et al. (2012), e compararam os resultados com outros modelos da literatura. Também em estudos envolvendo ambulâncias do Corpo de Bombeiros, Ferrari et al. (2018) formularam um modelo de otimização multiobjetivo para localização de ambulâncias na cidade do Rio de Janeiro/RJ e, através disso analisaram diferentes cenários com os objetivos de maximizar a população coberta, maximizar o número de pontos de demanda cobertos, minimizar o número de bases instaladas e também minimizar a distância entre os pontos de demanda e as bases instaladas. Os autores ainda adicionaram uma penalidade para evitar a instalação de bases em áreas menos viáveis economicamente. Aplicando uma modificação ao modelo FLEET para considerar dois tipos

de cobertura diferentes (ambulâncias básicas e avançadas) e trazendo uma abordagem multiobjetivo, Guimarães e Martins (2018) apresentam um estudo de caso no SAMU de Belo Horizonte/MG e através desse modelo, denominado FLEET-IC (*Facility Location and Equipment Emplacement Technique with Independent Coverages*), fazem uma análise de cenários alternativos, tentando maximizar o número de chamados cobertos e minimizar o desvio padrão do tempo de resposta médio dos chamados.

O emprego da Programação Matemática em combinação com outras técnicas de otimização também registra contribuições significativas. Utilizando o TEAM de Schilling et al. (1979) juntamente com o Algoritmo Genético Construtivo, Figueiredo, Lorena e Carvalho (2004) investigaram a localização das ambulâncias do SAMU da cidade de São José dos Campos/SP. Em um estudo de caso no SAMU de São Paulo/SP, Andrade e Cunha (2015) apresentam um modelo multiobjetivo que leva em conta a localização das bases, a alocação dos veículos em múltiplos períodos, e a realocação entre períodos subsequentes. Para chegar à solução os autores aplicam um algoritmo baseado na metaheurística Colônia Artificial de Abelhas, proposto por Karaboga (2005) para otimizar funções contínuas, multidimensionais e multimodais.

Mais focados na Simulação, especificamente utilizando a SED, Silva e Pinto (2010) e Pinto, Silva e Young (2015) apresentam modelos para estudar o SAMU de Belo Horizonte/MG. Para analisar possíveis melhorias para o sistema, em relação a localização das bases, os dois trabalhos utilizaram um modelo de otimização genérico, proposto por Fu (2002). Também em uma aplicação ao SAMU de Belo Horizonte, Nogueira, Pinto e Silva (2016) introduz um modelo de otimização e posteriormente testa os possíveis cenários obtidos através da SED. Já Marujo, Costa e Thompson (2016), em estudo sobre as configurações de localização das ambulâncias de uma empresa privada que presta serviços emergenciais na cidade do Rio de Janeiro/RJ, propõem uma formulação e, através da SED, analisa os cenários obtidos pela otimização.

Uma aplicação diferente pode ser encontrada em Oliveira (2008), que utilizou técnicas de Geoprocessamento para analisar a posição das bases das unidades e a distribuição das ocorrências do SAMU de Belo Horizonte/MG. Técnicas de Geoprocessamento realizam o tratamento de informações geográficas, ou de dados georreferenciados, por meio de *softwares* específicos e cálculos. Com os resultados obtidos pela aplicação de ferramentas de Geoprocessamento, o autor apontou a necessidade do reposicionamento das bases de ambulâncias para lugares mais próximos dos centros de massa e de boas vias de acesso.

3.2 Estudos no Mundo

Enquanto a seção anterior foca em abordagens ao problema da localização de ambulâncias no contexto brasileiro, com o emprego de várias técnicas da PO, a presente

seção tem o intuito de apontar estudos recentes, a nível mundial, realizados em EMSs com foco nas duas técnicas utilizadas na presente pesquisa: Programação Matemática e SED. Neste sentido, esta seção apresenta estudos que em sua grande maioria trabalham evoluções em modelos derivados daqueles apresentados no capítulo anterior. Em relação a simulação, apresentam-se aplicações que se valeram da ferramenta, principalmente combinada com modelos matemáticos. Percebe-se que o grande desafio dessas novas referências tem sido implementar modelos cada vez mais detalhados e mais próximos da realidade.

Dentre os estudos que apresentam evoluções àqueles modelos de otimização descritos na Seção 2.2, alguns incluíram características dinâmicas as formulações, seja na forma multiperíodo ou em tempo real. Estudos nesse sentido são frequentemente encontrados na literatura e merecem atenção devido a significativa contribuição para uma análise mais operacional do problema de localização de ambulâncias em EMSs, permitindo suporte a tomada de decisão no que se refere aos possíveis locais para a instalação de bases e também em formas ótimas para alocar/realocar ambulâncias.

Em estudo ao EMS de Viena, na Áustria, Schmid e Doerner (2010) apresentam o DSM MultiPeríodo (*Multi-period Double Standard Model* - mDSM), que além dos conceitos do DSM, trata as variações na demanda e as condições de tráfego em diferentes períodos do dia. O modelo é multiobjetivo e, ao mesmo tempo trabalha para evitar que veículos troquem de base desnecessariamente. O sistema opera com um único tipo de ambulância e o dia foi dividido em 6 períodos de 4 horas cada. Para resolver o problema os autores empregam uma heurística de busca em vizinhança variável (do inglês, *Variable Neighborhood Search*) já que o *software* IBM ILOG CPLEX® não foi capaz de apresentar resultados em um tempo computacional aceitável. Em Cali, na Colômbia, considerando três tipos de ambulâncias, Murillo e Peña (2018) empregaram no EMS local duas formulações multiperíodo, baseadas no DSM e no mDSM. Em outro estudo recente, Dinhofer e Sappadla (2018) também apresentam uma formulação multiperíodo com base no DSM e no mDSM e aplicam no EMS de Nova Iorque, nos Estados Unidos. Destaca-se ainda o trabalho de Başar, Çatay e Ünlüyurt (2011) em Istambul, na Turquia, apresentando o Modelo de Cobertura Dupla Substituta MultiPeríodo (*Multi-period Backup Double Covering Model*) que combina o Problema de Cobertura Substituta apresentado por Hogan e ReVelle (1986) ao DSM.

Em Xangai, na China, Su, Luo e Huang (2015) apresentam uma modificação no DSM alterando a função objetivo para minimizar o custo atribuído aos atrasos no atendimento das emergências (considerando um tempo de resposta padrão) somado ao custo operacional do EMS da cidade. O modelo é dinâmico e trata as variações temporais em tempo real. O tempo de deslocamento é calculado em tempo real através do *Google Maps*. Para resolver o problema, os autores empregam uma heurística de colônia de formigas.

Através de um estudo no EMS das cidades de Tuscaloosa e Birmingham, nos Esta-

dos Unidos, Zhi, Keskin e Melouk (2015) propõem um modelo para analisar as operações diárias em relação ao despacho das ambulâncias para o atendimento das ocorrências e a realocação periódica dos veículos. A principal premissa deste modelo é decidir quais ocorrências devem ser atendidas imediatamente e quais devem ser adiadas para períodos seguintes. Penalizações a função objetivo incorrem devido a espera por atendimento e por atrasos à resposta nos incidentes de alta prioridade. O modelo é multiperíodo e considera os níveis de prioridade das ocorrências, os padrões de demanda e os recursos do EMS. O objetivo do modelo é minimizar o custo operacional e ao mesmo passo garantir tempos de resposta aceitáveis.

No Irã, Maleki, Majlesinasab e Sepehri (2014) conduziram um estudo no EMS da cidade de Isfahã utilizando o Problema de Máxima Cobertura Esperada com Realocação, de Gendreau, Laporte e Semet (2006), para localizar ambulâncias e ainda apresentam dois modelos que tratam da realocação dos veículos após o término do atendimento às ocorrências. Os modelos determinam as movimentações das ambulâncias, usando os resultados obtidos através da localização otimizada e considerando todas as combinações possíveis entre as localidades do sistema. Os modelos visam minimizar o tempo total percorrido pelas ambulâncias e o tempo máximo de deslocamento. Os autores executaram as três formulações através do *software* IBM ILOG CPLEX®.

Em seu artigo, Moeini, Jemai e Sahin (2015) apresentam um modelo dinâmico baseado no modelo RP^t de Gendreau, Laporte e Semet (2001) e mostram a aplicação no EMS de Vale do Marne, na França. O modelo é designado Problema de Realocação Dinâmica (*Dynamic Relocation Problem*) e tem o objetivo de localizar bases e realocar ambulâncias através do controle da localização e dos movimentos dos veículos. Nesse sentido, um novo parâmetro é introduzido para ajustar o modelo de acordo com as flutuações na demanda. O parâmetro pode ser calculado utilizando os diferentes padrões de flutuação nas demandas durante um determinado período de tempo. A resolução do modelo foi feita através do *software* IBM ILOG CPLEX®.

Em Bochum, na Alemanha, Degel et al. (2015) aplicaram um modelo de otimização multiobjetivo e multiperíodo para maximizar a cobertura do serviço levando em conta as variações dinâmicas do sistema, o nível de cobertura exigido, os aspectos econômicos das operações e a flexibilidade das instalações. Para resolver os multiobjetivos do problema os autores aplicaram o método de escalarização das somas ponderadas. Para estudar o EMS da cidade Waterloo, no Canadá, Naoum-Sawaya e Elhedhli (2013) apresentam um modelo estocástico multiperíodo para o problema da realocação de ambulâncias com o objetivo de minimizar o número de realocações em um horizonte de tempo e ao mesmo tempo garantir um nível de serviço adequado.

Também no Canadá, na cidade de Montreal, Nair e Miller-Hooks (2009) dirigem um estudo que considera a realocação das ambulâncias entre as ocorrências, em tempo real.

Considerando a cobertura das demandas e os custos associados ao reposicionamento dos veículos os autores propõem um modelo multiobjetivo. Para a resolução os autores empregaram a técnica de escalarização problema das somas ponderadas, que foi executada na versão 10.1 do *software* IBM ILOG CPLEX®. Em seus resultados Nair e Miller-Hooks (2009) mostram que, quando os recursos são escassos, a realocação é uma alternativa atraente para aumentar o nível do serviço.

Na cidade de Beirute, capital do Líbano, Itani, Abdelaziz e Masri (2019) propõem uma extensão do modelo MEXCLP para uma abordagem biobjetivo, que maximiza a cobertura esperada e minimiza os custos de cobertura. O estudo é conduzido na Cruz Vermelha que atende a cidade. O EMS em questão passava por dificuldades operacionais na ocasião e apenas 10 das 20 ambulâncias disponíveis estavam aptas para os atendimentos. Sendo assim, os objetivos eram maximizar a cobertura esperada e minimizar o custo de atribuição das demandas ao atendimento de prestadores da iniciativa privada. Para a resolução a técnica de escalarização problema ϵ -restrito foi empregada.

Outra técnica que tem sido bastante utilizada no contexto dos EMSs é a Simulação. Essa técnica possibilita que os sistemas reais sejam descritos com alto grau de detalhamento e permite que as fontes de incerteza inerentes do mundo real sejam consideradas sem a necessidade de grandes simplificações tal como necessário em outros métodos (ABOUELJINANE; SAHIN; JEMAI, 2013).

Com o objetivo de avaliar os efeitos da localização das ambulâncias e o desempenho do EMS da Cidade do Cabo na África do Sul, Stein, Wallis e Adetunji (2015) utilizaram a SED para desenvolver um modelo capaz de representar a cidade, que possui 2.461 km^2 e operava com 49 ambulâncias para uma população 3.74 milhões de habitantes na época do estudo. O EMS sul-africano trabalha com quatro tipos de veículos: veículos de resposta primária sem transporte (*non-transport primary response vehicles*); veículos de suporte avançado; veículos de suporte básico; e veículos de suporte intermediário (*intermediate life support*). Os autores utilizam dados coletados, por meio de um sistema computacional, entre 1º de janeiro de 2012 e 31 de dezembro de 2012. Um Sistema de Informação Geográficas foi empregado. O simulador foi desenvolvido no *software* SIMIO e os resultados encontrados nos testes levaram os autores a concluir que, para o contexto da Cidade do Cabo, a descentralização das bases e o emprego de um único tipo de veículo podem contribuir significativamente para tempos de resposta melhores.

Kergosien et al. (2015) propõem um modelo genérico, adaptável a vários tipos de contextos, desenvolvido em SED, e que considera dois tipos de tarefas atribuíveis a ambulâncias: atender um chamado de emergência ou realizar transferências de pacientes. Implementado em linguagem de programação C++, o modelo foi testado com dados das cidades de Montreal e Laval, no Canadá, que juntas possuem cerca de 2.3 milhões de habitantes. Dois tipos de ambulâncias foram considerados (um tipo para atender emergências

e outro para transferências). Como regra, a ambulância mais próxima é sempre enviada para atender uma emergência e a localização das ambulâncias é sempre determinada em tempo real com base no estado do sistema. A região foi dividida em 600 zonas, foram levantados 40 candidatos a instalação de bases e, são considerados 2 centrais de operação e 15 hospitais. Os tempos de viagem entre bases, pontos de demanda e hospitais foram calculados usando a distância euclidiana entre pontos. Kergosien et al. (2015) concluem através dos experimentos computacionais, empregando estratégias e regras baseadas em outros EMSs, que seu modelo é capaz de representar adequadamente diferentes aspectos do contexto dos EMSs, podendo ser facilmente adaptado para lidar com diversos sistemas.

Em outro estudo em Vale do Marne, na França, Aboueljine et al. (2014) aplicam a SED para representar as operações do EMS em estudo e propor melhorias através de diferentes estratégias. A região possui uma área de 245 km^2 e uma população de 1.3 milhões habitantes, dividida pelos autores em 527 pontos de demanda de aproximadamente 2.000 habitantes. O modelo foi desenvolvido através do *software* ARENA e alimentado com dados coletados por 15 meses (outubro de 2010 a dezembro de 2011), totalizando 304.400 chamados. Uma consideração para o modelo é que o sistema opera com dois tipos de veículos: Ambulâncias Avançadas (Unidades Móveis de Terapia Intensiva) e Veículos Médicos (ambulâncias mais rápidas, que não transportam vítimas). As medidas de desempenho utilizadas são taxa de cobertura dentro de um tempo de resposta estabelecido e a taxa de utilização dos recursos humanos. Dentre as estratégias testadas, destaca-se o uso da ferramenta *OptQuest* (integrada ao ARENA) para otimizar a localização das ambulâncias em multiperíodos, permitindo assim, a realocação das ambulâncias entre as bases. Dentre os resultados, observa-se que o reposicionamento das ambulâncias pode aumentar o número de chamados cobertos, dentro de um padrão de cobertura de 20 minutos, em até 4,5% e um plano de realocação multiperíodo pode melhorar essa cobertura em até 7,3%.

Analisando as vantagens do uso da Simulação como ferramenta capaz de imitar sistemas reais e fornecer resultados fidedignos a realidade operacional em vários contextos, e também os benefícios da Programação Matemática que através de seus modelos pode fornecer configurações de operação otimizadas, alguns autores apresentam aplicações em EMS combinando as duas técnicas. Dessa forma, através do emprego de modelos matemáticos obtém-se uma configuração otimizada do sistema e através de um modelo de simulação é possível avaliar o desempenho das diversas configurações propostas.

Combinando a SED e a Programação Matemática, Lam et al. (2015) desenvolveram um estudo no EMS da cidade-estado de Singapura. O EMS em análise é relatado em operação com 36 ambulâncias de um único nível, que servem uma população de 5.3 milhões de habitantes divididos em 900 pontos de demanda. Foram considerados 52.512 chamados (de um período de 6 meses), coletados por um sistema computacional que armazena os dados geográficos dos incidentes, o perfil demográfico dos pacientes e o tempo de empenho

de cada ambulância. O modelo de simulação foi implementado em Microsoft Excel VBA (Excel 2007, Microsoft) e utilizou um Sistema de Informações Geográficas para calcular a distância entre as bases e os pontos de demanda. Esse cálculo considera variações no tempo de viagem de acordo com o dia da semana, o período do dia, o tempo de viagem ideal e a natureza da viagem. O modelo de otimização utilizado foi baseado no DSM e possui abordagem multiperíodo, com o objetivo de realocar as ambulâncias ao longo de um dia de serviço dividido em quatro períodos. Sua implementação foi realizada através dos softwares AIMMS e IBM ILOG CPLEX®. Em conclusão, Lam et al. (2015) identificam que a realocação das ambulâncias resulta em tempos de resposta e desempenho de cobertura superiores em comparação com políticas estáticas.

Também estudando o EMS da cidade de Xangai, Zhen et al. (2014) aplicam a SED, um Algoritmo Genético e a Programação Matemática para investigar o problema da localização e realocação das ambulâncias. Considera-se no estudo uma população de 23 milhões de habitantes dividida em 53 pontos de demanda de aproximadamente $10 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ ao longo de uma área de 6.340 km^2 . O sistema é composto por 30 hospitais, 12 bases e 80 ambulâncias. Primeiramente, o Algoritmo Genético foi utilizado para procurar soluções viáveis para a localização das ambulâncias e, em seguida o modelo de otimização em Programação Matemática trata do problema de realocação com abordagem multiperíodo. Tal formulação é nomeada Modelo Matemático para Realocação de Ambulâncias (*Mathematical Model For Ambulance Relocation*) e tem o objetivo de minimizar os custos de transporte e os custos de realocação. O modelo de simulação foi implementado através da ferramenta de programação Visual Studio C# 2008, possibilitando testes para as configurações resultantes das duas técnicas de otimização. Dentre as conclusões os autores destacam que, para o sistema de Xangai as ambulâncias não devem ser alocadas entre as bases de maneira equilibrada e que a realocação de ambulâncias pode ser mais significativa para a melhoria do sistema do que a inserção de novos recursos.

Leknes et al. (2017) apresentam a formulação do Problema de Localização de Máximo Desempenho Esperado para Regiões Heterogêneas (*Maximum Expected Performance Location Problem for Heterogeneous Regions*) adequado para EMSs que trabalham com demanda heterogênea e múltiplas medidas de desempenho. O modelo é estático e decide a localização/alocação das bases/ambulâncias considerando a taxa chegada de chamados, a taxa de serviço de cada base e as probabilidades de que um chamado seja atendido por uma base em específico. A aplicação foi feita no distrito de Sør-Trøndelag, na Noruega. Esse distrito é caracterizado por possuir sua população dispersa, sendo dois terços dos habitantes vivendo em áreas urbanas e um terço em áreas rurais. O objetivo da formulação é garantir à toda população um EMS de qualidade baseado em duas medidas de desempenho: probabilidade de sobrevivência de vítimas de parada cardíaca (função de sobrevivência) e cobertura baseada no tempo de resposta. Para analisar as configurações obtidas através do modelo os autores utilizaram a SED.

Utilizando dados do EMS da cidade de Mecklenburg nos Estados Unidos, Enayati et al. (2018) apresentam uma abordagem em tempo real para maximizar a cobertura com o mínimo de deslocamento possível dos veículos, considerando a carga de trabalho das equipes médicas das ambulâncias. Os autores citam que o modelo proposto, Abordagem de Otimização para Redistribuição (*Redeployment Optimization Approach*), é de fácil implementação e minimiza a dificuldade computacional para resolução de modelos dinâmicos que tratam o problema em tempo real. O modelo foi implementado no *software* IBM ILOG CPLEX®. Além de realocar ambulâncias ociosas o modelo indica a base a qual as ambulâncias que terminaram o atendimento de uma ocorrência devem se direcionar e para isso é necessário conhecer o estado atualizado do sistema em tempo real. Utilizando a linguagem de programação JAVA, um modelo de simulação em SED foi construído e através dele os autores avaliaram e compararam os resultados obtidos por seu modelo e por outros modelos da literatura.

Em Utreque, na Holanda, Jagtenberg, Bhulai e Mei (2015) aplicaram um estudo que propõem uma heurística polinomial dinâmica para determinar o reposicionamento das ambulâncias, baseados no modelo MEXCLP. Neste sentido, os autores nomeiam sua formulação como DMEXCLP (*Dynamic MEXCLP*). Os autores descrevem sua heurística como simples de ser aplicada e independente de simplificações, principalmente em relação ao estado do sistema. Jagtenberg, Bhulai e Mei (2015) também propõem um algoritmo para resolver sua heurística. Além disso, os autores utilizam um simulador para comparar os resultados de sua formulação com uma aplicação do modelo MEXCLP (estático). Em conclusão, Jagtenberg, Bhulai e Mei (2015) mostram que o DMEXCLP supera o MEXCLP em 16,8% em relação ao número de chamados cobertos dentro do tempo de resposta *benchmark* para o EMS.

Combinando as abordagens dos modelos MALP e MEXCLP, Sorensen e Church (2010) introduzem a formulação do LR-MEXCLP (*Local Reliability-MEXCLP*). Tal formulação combina o conceito de fração de ocupação local do modelo MALP com o conceito de máxima cobertura esperada da formulação MEXCLP. Sorensen e Church (2010) explicam que, uma vez que o principal objetivo de um EMS é maximizar a cobertura das demandas, a função objetivo do MALP (maximizar a disponibilidade das ambulâncias) pode gerar resultados ligeiramente inferiores. Entretanto, os autores frisam que o conceito de fração de ocupação local da formulação MALP é capaz de superar o conceito de ocupação uniforme do MEXCLP. Os dados trabalhados nesta pesquisa foram baseados nos registros do EMS de Washington, nos Estados Unidos. A execução dos experimentos de otimização foram por meio do *solver* IBM ILOG CPLEX®. Os autores se valem da simulação para mostrar que o LR-MEXCLP supera tanto o MEXCLP quanto o MALP em todos os cenários elaborados.

Em geral, seguindo as referências levantadas, a presente pesquisa visa contribuir para a evolução do uso de ferramentas da Pesquisa Operacional em estudos no SAMU no

Brasil por meio da aplicação de modelos de otimização, em Programação Matemática, e pelo uso da Simulação. Mais especificamente, seguindo os avanços dos estudos mundo a fora, visa-se contribuir para evolução das aplicações de modelos dinâmicos, com uma abordagem multiperíodo. A presente pesquisa acrescenta a dois modelos da literatura a abordagem multiperíodo. Além disso, tem-se o objetivo de aplicar às duas formulações uma abordagem multiobjetivo, tornando o problema mais complexo e ao mesmo tempo mais próximo da necessidade do sistema real do SAMU.

4 METODOLOGIA

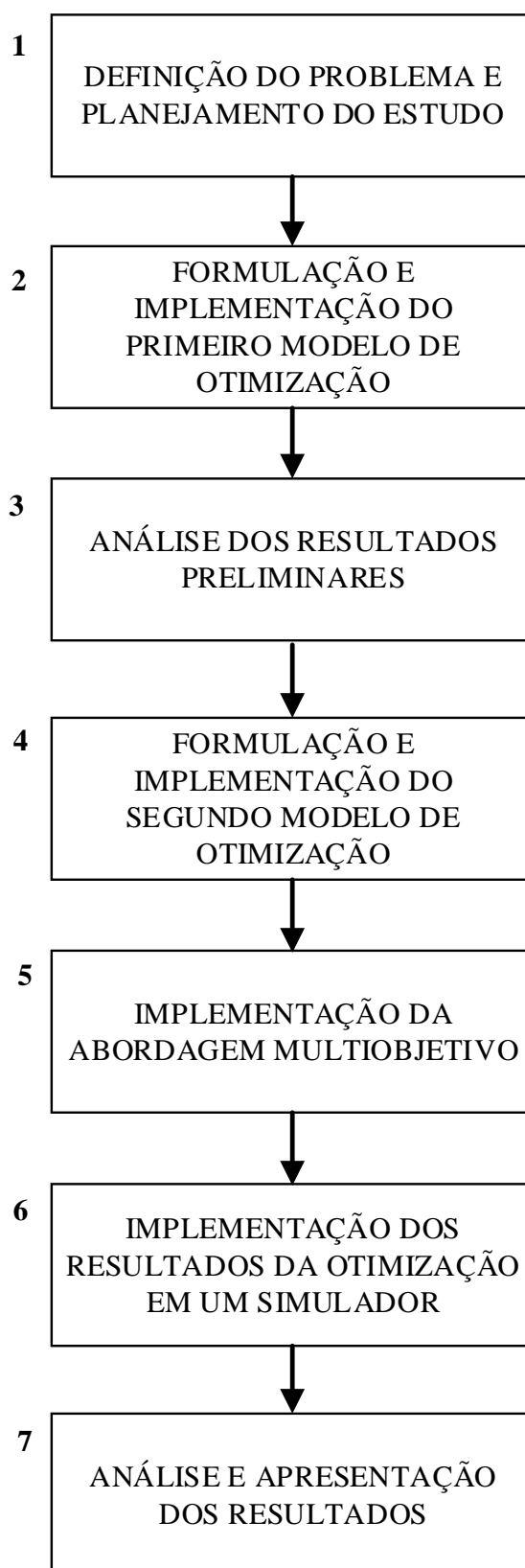
Este estudo possui abordagem quantitativa e classifica-se quanto a sua natureza como pesquisa aplicada, pois procura oferecer soluções por meio da aplicação de informações encontradas a partir de pesquisas para um problema específico (NEUMAN, 2013). Além disso, a presente pesquisa pode ser caracterizada por seu objetivo exploratório, uma vez que se propõe a gerar conhecimento para aplicação prática e, por meio do aprimoramento de ideias, solucionar problemas específicos. A modalidade de pesquisa adotada foi o estudo de caso, com o desenvolvimento do mesmo direcionado ao SAMU-BH. Segundo Gil (2002), essa abordagem baseia-se no estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos, de maneira que se permita seu amplo conhecimento.

O presente estudo, com a asserção de desenvolver modelos de otimização para tratar do problema de localização de bases e alocação e realocação de ambulâncias, de forma a maximizar a cobertura da demanda (dentro de tempos de resposta adequados), adota como metodologia uma adaptação das etapas sugeridas por Law (2013) para o desenvolvimento de um modelo de simulação. O estudo é desenvolvido por meio de duas vertentes da PO, sendo elas a Programação Matemática e a Simulação, que se encontram na nona etapa. A Figura 4 mostra as dez etapas a serem seguidas na metodologia, de acordo com sua ordem sequencial.

Na primeira etapa (definição do problema e planejamento do estudo), o problema de interesse foi estabelecido. Por meio da análise dos trabalhos de Silva (2010), Junior (2011), Pinto, Silva e Young (2015), Nogueira, Pinto e Silva (2016), Guimarães (2018) e Guimarães e Martins (2018), a necessidade por estudos sequenciais para aprimorar a localização das bases e ambulâncias do SAMU-BH fica evidente. Verifica-se a oportunidade para se empregar modelos de otimização, em Programação Matemática, com características dinâmicas e, por meio da Simulação avaliar os efeitos das configurações de localização resultantes da aplicação destes modelos. Define-se nesta etapa o uso da linguagem de programação C++ para a implementação dos modelos, executados por meio do *solver* IBM ILOG CPLEX®12.6.3.

Em seguida, na segunda etapa (formulação e implementação do primeiro modelo de otimização), define-se a formulação e implementação de um primeiro modelo de otimização com referência nos modelos FLEET, de Schilling et al. (1979), e FLEET-IC, de Guimarães (2018). Na etapa subsequente, terceira etapa, os resultados desta implementação foram analisados e apresentados (qualificação da presente pesquisa).

Figura 4 – Sequência de etapas para o desenvolvimento da presente pesquisa



Na quarta etapa (formulação e implementação do segundo modelo de otimização) uma segunda formulação, com base nos modelos TIMEXCLP de Repede e Bernardo (1994) e LR-MEXCLP de Sorensen e Church (2010), é proposta de forma que o problema possa ser tratado com considerações em relação a indisponibilidade das ambulâncias.

Avançando para a quinta etapa, implementação da abordagem multiobjetivo, uma segunda função objetivo é acrescentada às duas formulações propostas. Tal acréscimo permite que outro objetivo seja considerado e tratado pelas abordagens propostas.

Já na sexta etapa (implementação dos resultados da otimização em um simulador), os resultados das configurações propostas pelos dois modelos de otimização e as configurações atuais do SAMU-BH são implementadas em um simulador. Tal simulador foi desenvolvido em paralelo com esta pesquisa. Para a execução das rodadas de simulação uma validação do modelo de simulação é necessária a fim de se comprovar a representatividade do sistema real por meio de tal ferramenta.

Por fim, na sétima etapa (análise e apresentação dos resultados), os resultados dos modelos de otimização e da simulação serão analisados e considerações serão acrescentadas a este estudo. Desta forma, por fim, tais análises serão apresentadas no Capítulo 5 e as considerações finais no Capítulo 6.

4.1 Definição dos modelos

Definem-se os seguintes parâmetros para a formulação dos modelos de otimização:

- I : conjunto dos pontos de demanda;
- J : conjunto dos candidatos a instalação de bases;
- T : conjunto de períodos;
- U : conjunto de tipos de ambulância;
- P_u : quantidade de ambulâncias tipo $u \in U$ disponíveis para alocação;
- S_u : tempo crítico de resposta para cada tipo $u \in U$ de ambulância;
- C_j : quantidade de ambulâncias que cada base $j \in J$ é capaz de alocar;
- r_{ji} : tempo de resposta entre a base $j \in J$ e o ponto de demanda $i \in I$;
- N_i^u subconjunto de bases $j \in J$ capazes de cobrir o ponto de demanda $i \in I$ com a ambulância tipo $u \in U$ dentro do tempo de resposta S_u ($r_{ji} \leq S_u$);
- d_{iu}^t : quantidade de chamados históricos originados de cada ponto de demanda $i \in I$ com o empenho de cada tipo de ambulância $u \in U$ em cada período $t \in T$.

Os índices utilizados nas formulações são os seguintes:

- j : cada ponto candidato a instalação de base dentro do conjunto J , $j \in J$;
- i : cada ponto de demanda do conjunto I , $i \in I$;
- u : cada tipo de ambulância do conjunto U , $u \in U$;

- t : cada período dentro do conjunto T , $t \in T$;
- k : cada unidade de cada tipo de ambulância do conjunto U , $k \in U$.

4.1.1 Modelo determinístico

A formulação do primeiro modelo de otimização, conforme proposto, foi baseada nos modelos FLEET, de Schilling et al. (1979), e FLEET-IC, de Guimarães (2018). Tal modelo de otimização, elaborado em Programação Matemática, visa maximizar a cobertura do serviço de atendimento do SAMU-BH considerando as variações da demanda ao longo do dia.

O modelo trata as coberturas das USAs e USBs de forma separada e independente (FLEET-IC), já que se tratam de ambulâncias com quantidades, equipamentos, equipes e tempos de resposta diferentes. Além disso, a principal evolução em relação ao modelo FLEET-IC é que com a incorporação do parâmetro de tempo (T), mudanças em relação ao posicionamento das ambulâncias nas bases podem ocorrer entre períodos. Ou seja, permite-se que os veículos sejam realocados entre as bases instaladas no final de um período t . A justificativa para a inserção deste novo parâmetro corresponde às variações temporais e espaciais que a demanda apresenta ao longo do dia.

Dessa forma, o problema passa a tratar da localização de bases e da alocação/realocação das ambulâncias nestas bases ao longo de multiperíodos. Por inserir a estratégia dinâmica multiperíodo, através da adição do parâmetro T , o modelo é nomeado FLEET-ICt (*Time Facility Location and Equipment Emplacement Technique with Independent Coverages*).

São empregadas três variáveis no modelo, sendo elas:

- $z_j \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se a base $j \in J$ estiver ativa e 0, caso contrário;
- $x_{ju}^t \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se uma ambulância do tipo $u \in U$ for instalada na base $j \in J$ no período $t \in T$ e 0, caso contrário;
- $y_{iu}^t \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se o ponto de demanda $i \in I$ for coberto pela ambulância tipo $u \in U$ no período $t \in T$ e 0, caso contrário.

Dados os parâmetros, os índices e as variáveis formula-se o modelo FLEET-ICt da seguinte forma:

$$\text{Maximizar cobertura } \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} d_{iu}^t y_{iu}^t \quad (19)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i^u} x_{ju}^t \geq y_{iu}^t, \quad \forall i \in I, \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (20)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ju}^t \leq P_u, \quad \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (21)$$

$$\sum_{u \in U} x_{ju}^t \leq C_j z_j, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (22)$$

$$x_{ju}^t \leq z_j, \quad \forall j \in J, \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (23)$$

$$z_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (24)$$

$$x_{ju}^t \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (25)$$

$$y_{iu}^t \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall u \in U, \forall t \in T. \quad (26)$$

A função objetivo (19) maximiza a quantidade de chamados cobertos em cada período, dessa forma quanto mais ocorrências um ponto de demanda coberto gera para determinado tipo de ambulância em cada período t , mais a função objetivo é incrementada. Assim, o modelo prioriza a instalação de bases e alocação das ambulâncias de forma que seja possível cobrir pontos de maior demanda, em cada período t . O conjunto de restrições (20) determina que um ponto de demanda só pode ser considerado coberto por um tipo de ambulância, em um dado período, se houver pelo menos uma ambulância deste mesmo tipo alocada dentro da zona de cobertura deste ponto de demanda. Através do conjunto de restrições (21) limita-se o número de ambulâncias de cada tipo a ser alocado em cada período de acordo com a quantidade disponível no sistema. O conjunto de inequações (22) define a quantidade máxima de ambulâncias que cada base é capaz de alocar. Para garantir que as ambulâncias não serão alocadas a pontos em que não há bases ativas emprega-se o conjunto de inequações (23). Finalmente, definem-se os domínios das variáveis nas restrições (24), (25) e (26).

A aplicação do modelo FLEET-ICt implica que deve-se assumir que as ambulâncias estarão sempre disponíveis quando solicitadas. Tal consideração pode ser observada como uma limitação, uma vez que as ambulâncias ficam indisponíveis sempre que estão em situações de atendimento. Sendo assim, considerá-las sempre disponíveis superestima a capacidade das mesmas, ao passo que pontos de demanda com grande volume de chamados ficarão grande parte do tempo descobertos uma vez que o modelo priorizará a instalação de uma única ambulância cobrindo o maior número de demandas possível seja qual for a intensidade desta demanda.

4.1.2 Modelo estocástico

A segunda formulação proposta é baseada nos modelos TIMEXCLP de Repede e Bernardo (1994) e LR-MEXCLP de Sorensen e Church (2010). No modelo LR-MEXCLP a incerteza sobre a disponibilidade das ambulâncias é considerada, por meio da mensuração do nível de serviço fornecido, levando-se em conta o volume de chamados gerados pelos pontos de demanda, o tempo em que as ambulâncias ficam empenhadas nos chamados e a quantidade de veículos disponíveis dentro de sua zona de cobertura. Também propõe-se para esta formulação o tratamento das variáveis de instalação de bases e de alocação de ambulâncias de forma separada, tal como empregado no modelo FLEET de Schilling et al. (1979). Além disso, acrescenta-se à formulação o conceito de coberturas independentes, tal como implementando no modelo FLEET-IC de Guimarães (2018). Então, a versão multiperíodo do modelo LR-MEXCLP considerando coberturas independentes pode ser chamada LR-MEXCLP-ICt (*Local Reliability Maximum Expected Covering Problem with Independent Coverages and Time Varying Demands*).

Para determinar o nível de serviço dos pontos de demanda é necessário o cálculo da fração de ocupação de cada ponto de demanda $i \in I$ para cada tipo de ambulância $u \in U$ em cada período $t \in T$ dado a alocação de $k \in P_u$ ambulâncias dentro de sua vizinhança. Neste caso, o conceito de vizinhança N_i^u representa o conjunto de pontos de demanda $j \in I$ que estão distantes de um dado ponto de demanda i a uma distância menor ou igual ao tempo de resposta máximo que se configura o conceito de cobertura ($r_{ji} \leq S_u$). O parâmetro d_{ju}^t representa o tempo de serviço demandado para o tipo de ambulância u em dado período t dentro desta mesma vizinhança N_i^u . A fração de ocupação é designada como $b_{iu,k}^t$ e obtido por meio da Equação (27).

$$b_{iu,k}^t = \frac{\sum_{j \in N_i^u} d_{ju}^t}{k} \quad (27)$$

O propósito do cálculo da fração de ocupação em $b_{iu,k}^t$ é para que se determine a probabilidade de que todas as k ambulâncias do tipo u que servem o ponto de demanda i no período t estejam ocupadas. Este valor é subtraído de 100% para determinar a probabilidade de haver pelo menos uma ambulância deste mesmo tipo u disponível para este mesmo ponto de demanda i neste mesmo período t . Sendo assim, o nível de serviço de cada ponto de demanda $i \in I$ para cada tipo de ambulância $u \in U$ em cada período $t \in T$ dado a alocação de $k \in P_u$ ambulâncias dentro de sua zona de cobertura, neste mesmo período, é designado como $q_{iu,k}^t$ e é obtido por meio da Equação (28).

$$q_{iu,k}^t = 1 - (b_{iu,k}^t)^k \quad (28)$$

Por meio dos cálculos da Equação (27) é possível inferir que, quanto maior o valor de k , que é o número de veículos instalados dentro da zona de cobertura de dado ponto de demanda i , menor será o valor de $b_{iu,k}^t$. Consequentemente, na Equação (28) tem-se que quanto menor for o valor de $b_{iu,k}^t$ maior será o valor de $q_{iu,k}^t$. Ou seja, dado um tempo de serviço demandado pelos chamados - de um dado tipo de ambulância, em um dado período - quanto mais veículos estiverem dentro de sua zona de cobertura (ou quanto menor o tempo de serviço demandado) menor será a fração de ocupação gerada por este ponto de demanda. Neste sentido, quanto menor a fração de ocupação deste mesmo ponto de demanda maior será o nível de serviço dado um número de ambulâncias alocadas.

Três variáveis binárias são empregadas a formulação do LR-MEXCLP-ICt, sendo elas:

- $z_j \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se a base $j \in J$ estiver ativa e 0, caso contrário;
- $x_{ju}^t \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se uma ambulância do tipo $u \in U$ for instalada na base $j \in J$ no período $t \in T$ e 0, caso contrário;
- $y_{iu,k}^t \in \{0, 1\}$: assume valor 1 se o ponto de demanda $i \in I$ for coberto pela ambulância tipo $u \in U$ no período $t \in T$ com $k \in P_u$ veículos e 0, caso contrário.

Dados os parâmetros, os índices e as variáveis formula-se o modelo LR-MEXCLP-ICt da seguinte forma:

$$\text{Maximizar Cobertura} = \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^{K_{max}} d_{iu}^t q_{iu,k}^t y_{iu,k}^t \quad (29)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i^u} x_{ju}^t - \sum_{k=1}^{K_{max}} k y_{iu,k}^t \geq 0, \quad \forall i \in I, u \in U, \forall t \in T, \quad (30)$$

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} y_{iu,k}^t \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (31)$$

$$\sum_{j \in J} x_{ju}^t \leq P_u, \quad \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (32)$$

$$\sum_{u \in U} x_{ju}^t \leq C_j z_j, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (33)$$

$$x_{ju}^t \leq z_j, \quad \forall j \in J, \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (34)$$

$$z_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (35)$$

$$x_{ju}^t \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall u \in U, \forall t \in T, \quad (36)$$

$$y_{iu,k}^t \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall u \in U, \forall k = 1, \dots, P_u, \forall t \in T. \quad (37)$$

A função objetivo (29) maximiza o número de demandas cobertas multiplicado pelo nível de de serviço prestado, em cada período. Dessa forma, quanto melhor o nível de serviço e quanto maior o número de demandas cobertas, em cada período t , mais a função

objetivo é incrementada. O primeiro conjunto de restrições (30) determina o número de ambulâncias de cada tipo u para cobrir os pontos de demanda i . Por meio desse conjunto de restrições, se o somatório de x_{ju}^t for menor do que o valor de k ambulâncias, então não é possível atribuir 1 para a variável binária $y_{iu,k}^t$. Dado o fato de que o valor de $q_{iu,k}^t$ é diretamente proporcional ao valor de k , será atribuído a variável $y_{iu,k}^t$ o valor 1 sempre com o maior valor de k possível, para cada ponto de demanda i . Por meio do conjunto de restrições (31) garante-se que deve ser estabelecido no máximo um valor de $y_{iu,k}^t$ para cada ponto de demanda i para cada tipo de ambulância u em cada período t . Através do conjunto de restrições (32) limita-se o número de ambulâncias de cada tipo a ser alocado em cada período de acordo com a quantidade disponível no sistema. O conjunto de inequações (33) define a quantidade máxima de ambulâncias que cada base é capaz de alocar. Para garantir que as ambulâncias não serão alocadas a pontos em que não há bases ativas emprega-se o conjunto de inequações (34). Finalmente, definem-se os domínios das variáveis nas restrições (35), (36) e (37).

A aplicação do LR-MEXCLP-ICt também exige que simplificações sejam tomadas e assim limitações acabam sendo impostas a formulação. É importante perceber que utilizar o conceito de fração de ocupação local (para os pontos de demanda i) exige que se considere que as ambulâncias atenderão apenas chamados dentro de sua zona de cobertura, ou seja, dentro de sua zona de serviço. Isto nem sempre representa a realidade da melhor maneira, uma vez que as ambulâncias podem atender livremente chamados em qualquer ponto, mesmo que fora de sua zona de cobertura, desde que sejam a melhor opção para o atendimento. Entretanto, tal simplificação é inerente a maioria dos modelos de cobertura, que consideram a cobertura de forma binária. Ou seja, é coberto ou não é coberto dado um padrão de distância estabelecido $\{1, 0\}$.

4.1.3 Comparativo: FLEET-ICt x LR-MEXCLP-ICt

Conforme pode ser observado, existem variáveis e restrições que exercem o mesmo papel em ambas formulações. Basicamente, o que difere os dois modelos é o conceito de cobertura atribuído a cada uma das funções objetivo e também o uso da variável y . O Quadro 2 sintetiza uma comparação entre os dois modelos.

Na formulação FLEET-ICt, a função objetivo visa maximizar a cobertura, que possui uma abordagem determinística. Isso significa que, no modelo FLEET-ICt o conceito de cobertura está diretamente atribuído a alocação (ou não) de um veículo dentro da zona de cobertura das demandas. Neste caso, o papel da variável y é indicar se os pontos de demanda estão cobertos (ou não).

Na formulação LR-MEXCLP-ICt, a função objetivo também procura maximizar a cobertura, entretanto a formulação sempre buscará essa maximização atribuindo o melhor nível de serviço possível - mais próximo de 1. Sendo assim, o papel da variável y é indicar

se os pontos de demanda estão cobertos e qual o nível de serviço (número de ambulâncias - k) atribuído a cada um deles.

Quadro 2 – Comparativo entre as duas formulações

MODELO:	FLEET-ICt	LR-MEXCLP-ICt
Função objetivo	Maximiza a cobertura	Maximiza a cobertura (buscando um nível de serviço mais próximo de 1)
Cobertura	Determinística: o conceito de cobertura leva em conta a alocação da ambulância dentro da zona de cobertura ($r_{ji} \leq S_u$)	Estocástica: mesmo conceito de cobertura ($r_{ji} \leq S_u$), mais a consideração sobre a taxa de ocupação
Variável:	y_{iu}^t :	$y_{iu,k}^t$:
	Indica se um ponto de demanda recebe cobertura ou não	Indica se um ponto de demanda recebe cobertura com nível de serviço k ou não

4.1.4 Abordagem multiobjetivo

No cumprimento à sua função básica, que é responder às situações de urgência médica de forma organizada, o SAMU deve evitar o uso excessivo de recursos. Por isso, os benefícios de incrementar o número de chamados cobertos dentro de tempos de resposta considerados satisfatórios devem ser balanceados em relação aos custos dos investimentos necessários para aumentar a capacidade do sistema. Dentre esses recursos destaca-se o número de ambulâncias empregadas e a quantidade de bases instaladas.

Em relação ao número de ambulâncias no sistema, as restrições Equação (21) (modelo FLEET-ICt) e Equação (32) (modelo LR-MEXCLP-ICt) limitam a sua utilização em referência ao número máximo disponível para o SAMU-BH. Entretanto, em relação ao número de bases a serem instaladas, não existe um parâmetro que determine a quantidade máxima. Através das formulações pode-se perceber que a otimização pode atribuir uma base diferente para cada veículo em cada período. Assim, para um número maior de períodos pode-se esperar um número maior de bases instaladas.

Todavia, a instalação de bases pode ser custosa ao SAMU, visto que conforme mencionado na Seção 1.1, o Ministério da Saúde (2014) estabelece que as bases devem possuir um ambiente estruturado - com quartos para descanso dos profissionais, copa, sala de estar, banheiros, estacionamento coberto para os veículos e almoxarifado. Sendo assim, apresenta-se uma proposta multiobjetivo que baseia-se no acréscimo de uma segunda função objetivo, que visa minimizar o número de bases a serem instaladas, conforme Equação (38).

$$\text{Minimizar } f_2 = \sum_{j \in J} z_j \quad (38)$$

Aplicando a técnica de escalarização P- ϵ , a função objetivo f_2 é transformada em restrição, Equação (39), para as duas formulações mono objetivo propostas em Subseção 4.1.1 e Subseção 4.1.2. Sendo que, ϵ indica a quantidade de bases que podem ser instaladas a cada iteração.

$$f_2 \leq \epsilon \quad (39)$$

Sendo assim, a versão biobjetivo da formulação FLEET-ICt pode ser representada de forma simplificada como se segue:

$$\text{Maximizar cobertura } \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} d_{iu}^t y_{iu}^t \quad (40)$$

$$\text{sujeito a: (20) – (26)} \quad (41)$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq \epsilon. \quad (42)$$

Como apresentado na Subseção 4.1.1, a função objetivo (40) visa maximizar a quantidade de chamados cobertos em cada período. As restrições (20) - (26) seguem a mesma finalidade descrita para a versão mono objetivo do modelo FLEET-ICt. A restrição (42) restringe o número de bases instaladas em ϵ , conforme a segunda função objetivo f_2 inserida ao problema.

Dado a incorporação da segunda função objetivo no modelo LR-MEXCLP-ICt sua versão biobjetivo é apresentada:

$$\text{Maximizar Cobertura} = \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} \sum_{t \in T} \sum_{k=1}^{K_{max}} d_{iu}^t q_{iu,k}^t y_{iu,k}^t \quad (43)$$

$$\text{sujeito a: (30) – (37)} \quad (44)$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq \epsilon. \quad (45)$$

Conforme apresentado anteriormente, a função objetivo (43) maximiza o número de demandas cobertas multiplicado pelo nível de de serviço prestado, em cada período. As restrições (30) - (37) cumprem o mesmo papel citado na Subseção 4.1.2. Por fim, a restrição (45) caracteriza a aplicação da técnica de escalarização P- ϵ para a segunda função objetivo, que tem o objetivo de minimizar o número de bases instaladas dado um valor de ϵ .

4.1.5 Simulação

Para testar as configurações propostas pela otimização nas formulações FLEET-ICT e LR-MEXCLP-ICT utiliza-se um simulador, que foi desenvolvido pela equipe do PPSUS (Programa Pesquisa Para o SUS). A construção de tal simulador foi baseada na simulação de eventos discretos (SED) e o seu desenvolvimento foi realizado por meio da linguagem de programação JAVA. Além disso, o simulador pode ser classificado como dinâmico, já que representa o sistema a medida que o mesmo evolui ao longo do tempo, e como estocástico, uma vez que as demandas são geradas com base probabilística.

Ambulâncias e chamados são as principais entidades do sistema. As ambulâncias são entidades permanentes e os chamados são entidades temporárias. Conforme citado na Seção 1.1, o modelo apresentado pela Figura 1 representa o sistema através de três pontos importantes: geração (recebimento) de chamados (**A**), despacho de ambulâncias (**B**) e jornada das ambulâncias (**C**). O funcionamento do simulador utilizado pode ser descrito em 5 etapas:

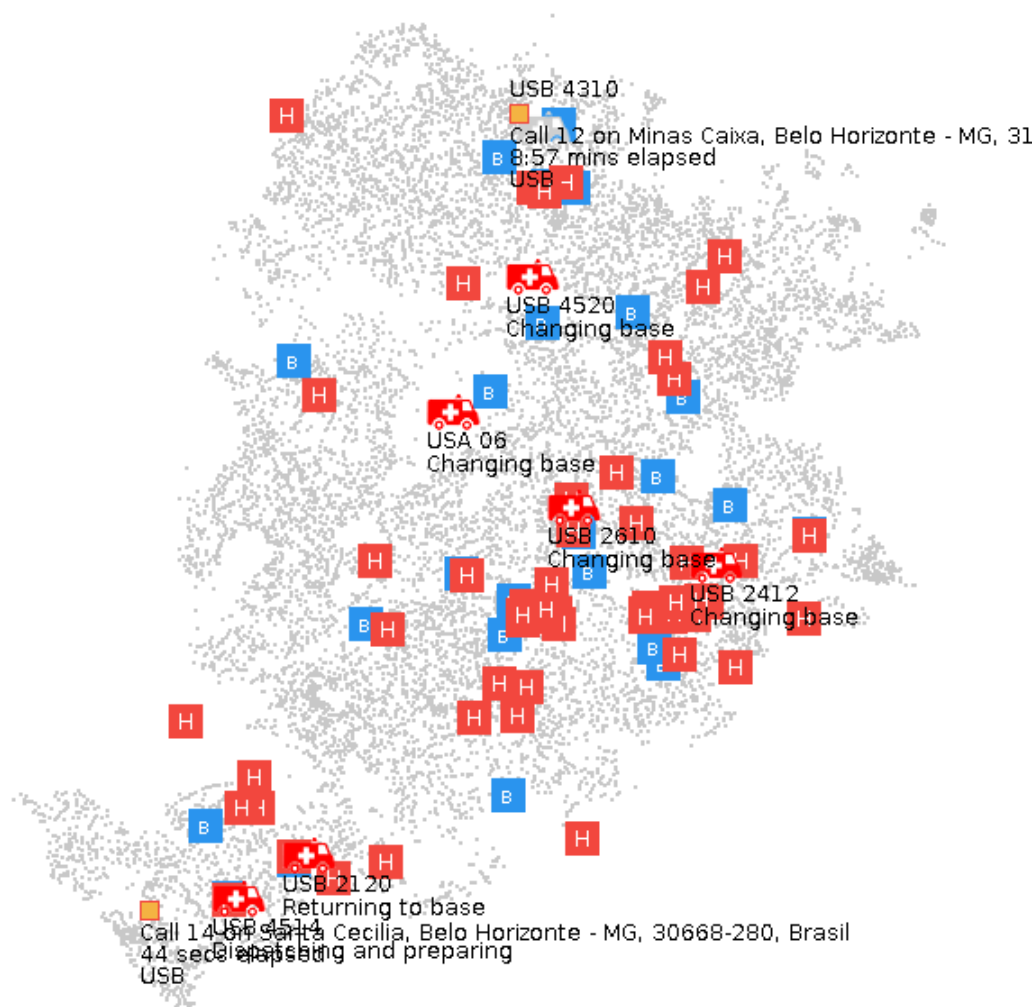
1. Geração da instância: a localização das bases e a alocação das ambulâncias é informada e a instância é gerada contendo todas informações do sistema (localização e alocação das ambulâncias, localização, tipo e instante de cada demanda e localização dos hospitais);
2. Inicialização do simulador com a leitura da instância de entrada;
3. A simulação é iniciada e as demandas começam a surgir;
4. De acordo com a característica das ocorrências e configuração corrente do sistema, é determinada a ambulância mais adequada para atender a cada emergência. A regra de despacho considerada segue as informações sobre o tipo de ocorrência (USAs ou USBs) e a localização do incidente, para que seja empenhada a ambulância mais próxima. Em situações em que não for possível despachar a ambulância mais próxima, a ambulância mais imediata é enviada;
5. As ambulâncias realizam tarefas relacionadas a viagens, pré-atendimento no local, entrega no hospital, realocação e reabastecimento (reposição de materiais). É possível que as ambulâncias realizem todas essas tarefas, ou apenas algumas delas, em cada viagem.

Baseado no banco de dados que é apresentado na Seção 4.2 os chamados são gerados, considerando diferentes probabilidades de demanda por faixa horária e por tipo de ambulância, seguindo a distribuição de Poisson. Ao total são geradas instâncias com 7.392 chamados, sendo 936 demandas por USAs e 6.456 demandas por USBs. A Figura 5 apresenta a interface visual do simulador.

O simulador é configurado através da plotagem de um ponto central representando cada um dos 11.976 Códigos de Endereçamento Postal (CEP) da cidade de Belo Horizonte.

Além disso, existe uma matriz de distância que atribui um valor de distância de ponto a ponto. Tal matriz de distância foi extraída por meio do *Google Maps*.

Figura 5 – Interface gráfica do simulador

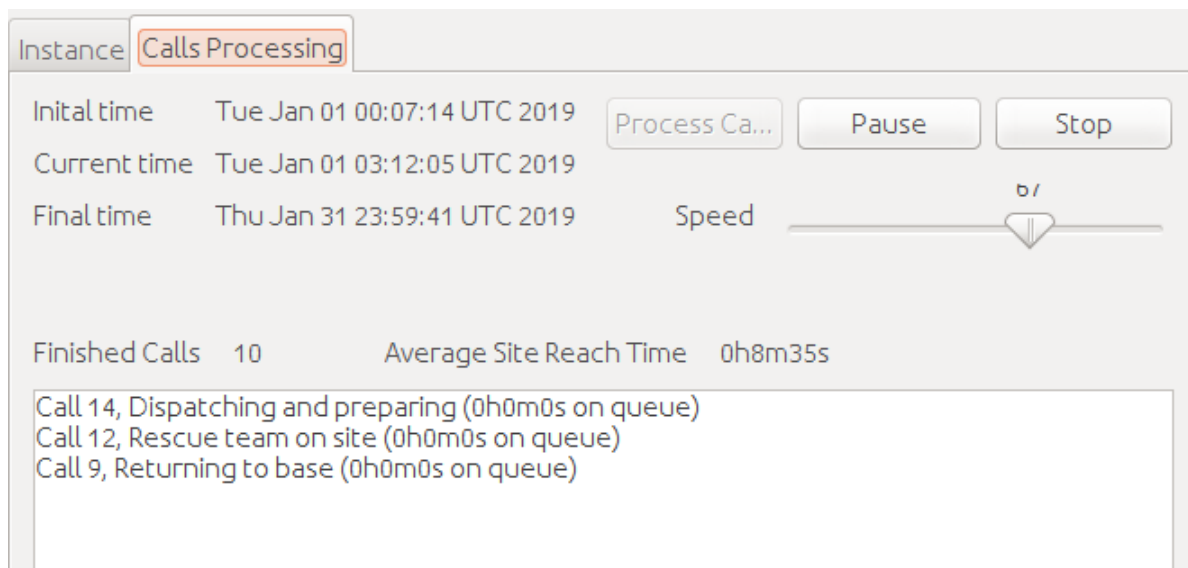


A representação da interface gráfica do simulador apresentada permite identificar a representação dos hospitais, Centros Médicos, Pronto Socorros e outros pontos hospitalares (itens em vermelho assinalados com a letra H), das bases (itens em azul assinalados com a letra B), das ambulâncias e dos chamados gerados (itens no formato quadrado na cor laranja).

A Figura 6 mostra a interface de processamento do simulador. São simulados 31 dias - representando o mês de janeiro de 2019. Após o fim do atendimento de todas demandas geradas a simulação se encerra e um arquivo com as saídas é fornecido. Neste arquivo de saída são informados todos os atendimentos realizados, detalhando o tipo de ambulância empenhado, o tempo de fila, o tempo entre o recebimento do chamado e o despacho da

ambulância, o tempo de deslocamento da ambulância até o local do incidente e o tempo de resposta de cada chamado.

Figura 6 – Interface do processamento de chamados



4.2 Coleta de dados

Os dados trabalhados nesta pesquisa são os mesmos coletados e apresentados na Dissertação de Guimarães (2018). Tal banco de dados possui registros do SAMU-BH referentes às ocorrências que empenharam ambulâncias avançadas e/ou básicas, no período de maio de 2016 a abril de 2017. Dois grupos de registros são formados, sendo eles:

- Amostra A: ocorrências em que houveram empenho de USAs. Coletados 100% dos chamados durante 12 meses, totalizando 12.777 ocorrências;
- Amostra B: ocorrências em que houve empenho de USBs. Foram registradas as ocorrências atendidas em 1/3 dos dias úteis, durante 12 meses, totalizando 16.271 registros. Sendo que os dados foram coletados em 18 segundas e quintas-feiras e 17 terças, quartas e sextas.

A planilha de registros contém as seguintes informações: número do chamado, bairro e cidade da ocorrência, horário do registro da ocorrência, horário de saída da ambulância para o atendimento, horário de chegada do veículo no local do incidente, destino (hospital, centro médico, Unidades de Pronto Atendimento, etc), horário de chegada da ambulância no destino, e horário de liberação do veículo. Tais informações serão fundamentais para a implementação dos modelos de otimização e do modelo de simulação.

4.2.1 Análise dos dados

O comportamento histórico dos chamados registrados no banco de dados foi analisado e será apresentado nesta seção. A distribuição das ocorrências foi avaliada conforme o tipo de ambulância (avançada ou básica) dentro dos seguintes parâmetros: atendimentos por faixa horária, por dia da semana e por regional.

Durante a manipulação do banco de dados foram identificados registros com campos sem preenchimento ou preenchidos incorretamente. Desta forma, tais registros foram descartados. Somando-se o número de registros para a cidade de Belo Horizonte em que houve empenho de USAs (12.777) com o número de ocorrências que demandaram USBs (16.271) tem-se um total de 29.048 ocorrências catalogadas no banco de dados. Deste total, 89,7% possuíam o preenchimento conforme as informações necessárias, sendo 10.537 chamados demandando o atendimento de USAs (82,5 % do total para este tipo de ambulância) e 15.487 ocorrências demandando o atendimento de USBs (95,2 % do total para este tipo de ambulância).

Em relação a distribuição dos chamados por faixa horária a Tabela 1 traz uma síntese de como as demandas por USAs e USBs estão divididas pelos períodos do dia, fracionados de 1 em 1 hora. A Figura 7 mostra que as demandas pelos dois tipos de ambulâncias apresentam um comportamento similar em relação a evolução da demanda ao longo das faixas horárias.

Figura 7 – Evolução do volume de demandas por faixa horária

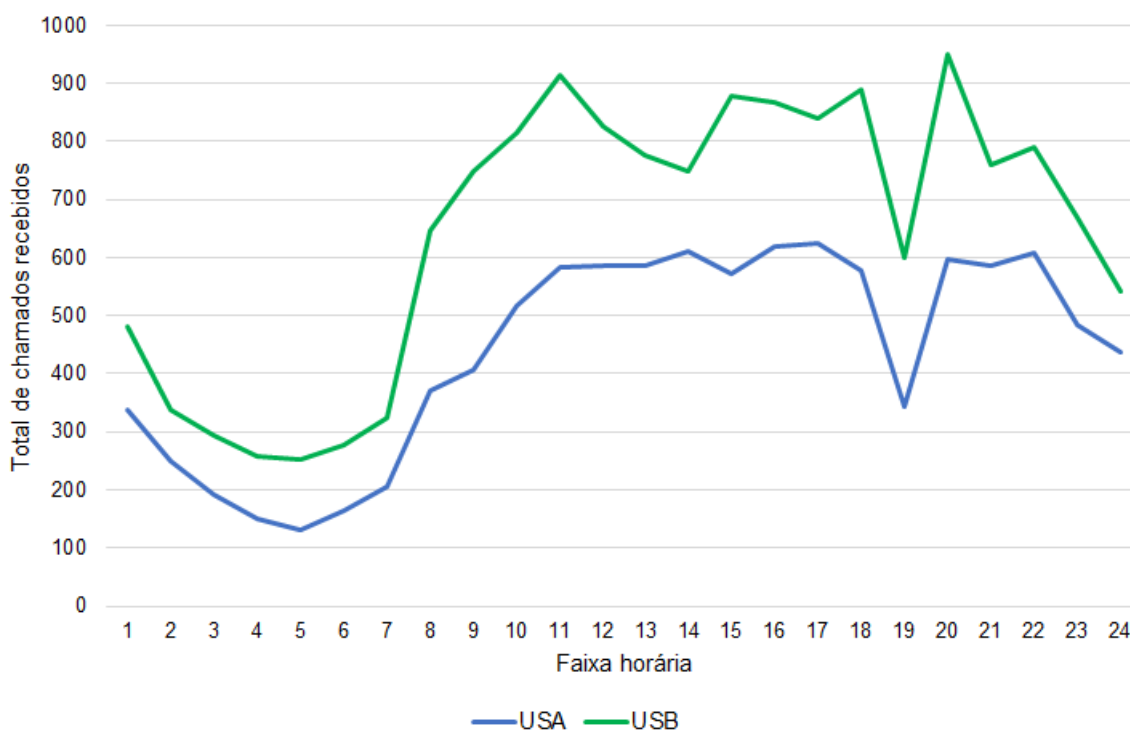


Tabela 1 – Chamados por faixa horária - USA e USB

Período	Faixa horária	USA	%	USB	%
00:00 - 00:59	1	337	3,2%	482	3,1%
01:00 - 01:59	2	250	2,4%	337	2,2%
02:00 - 02:59	3	193	1,8%	294	1,9%
03:00 - 03:59	4	150	1,4%	258	1,7%
04:00 - 04:59	5	132	1,3%	253	1,6%
05:00 - 05:59	6	163	1,5%	276	1,8%
06:00 - 06:59	7	206	2,0%	324	2,1%
07:00 - 07:59	8	371	3,5%	648	4,2%
08:00 - 08:59	9	408	3,9%	749	4,8%
09:00 - 09:59	10	517	4,9%	815	5,3%
10:00 - 10:59	11	584	5,5%	913	5,9%
11:00 - 11:59	12	586	5,6%	827	5,3%
12:00 - 12:59	13	585	5,6%	776	5,0%
13:00 - 13:59	14	612	5,8%	748	4,8%
14:00 - 14:59	15	571	5,4%	879	5,7%
15:00 - 15:59	16	618	5,9%	868	5,6%
16:00 - 16:59	17	624	5,9%	840	5,4%
17:00 - 17:59	18	578	5,5%	890	5,7%
18:00 - 18:59	19	343	3,3%	599	3,9%
19:00 - 19:59	20	596	5,7%	949	6,1%
20:00 - 20:59	21	585	5,6%	761	4,9%
21:00 - 21:59	22	607	5,8%	789	5,1%
22:00 - 22:59	23	483	4,6%	670	4,3%
23:00 - 23:59	24	438	4,2%	542	3,5%
TOTAL		10537	100%	15487	100%

Conforme observado, o pico de demanda para as USAs está na faixa horária 17 (16:00 horas até 16:59 horas) com 624 registros, enquanto a maior quantidade de demandas para as USBs está na faixa horária 20 (19:00 horas até 19:59 horas) com 949 chamados. Já as faixas horárias que concentram menor volume de demanda são as do turno da madrugada, sendo a faixa horária 5 (04:00 horas até 04:59 horas) a que apresenta menor número de chamados, sendo 132 registros para as USAs e 253 registros para as USBs.

O detalhamento da distribuição das demandas recebidas por USAs e USBs por dia da semana e por faixa horária é apresentado na Tabela 2. Para esta análise é importante recapitular, conforme mostrado na Seção 4.2, que para as USBs não foram coletados dados referentes a sábados e domingos. Para as USAs o dia que apresentou maior demanda foi segunda-feira, com 1635 registros. Já para as USBs o dia com maior volume de chamados foi quinta-feira.

Tabela 2 – Chamados por dia e por faixa horária - USA e USB

dia faixa horária	domingo		segunda-feira		terça-feira		quarta-feira		quinta-feira		sexta-feira		sábado	
	USA	USB	USA	USB	USA	USB	USA	USB	USA	USB	USA	USB	USA	USB
1	57	-	45	108	47	90	45	78	42	100	38	106	63	-
2	45	-	35	64	34	66	34	64	31	83	32	60	39	-
3	38	-	18	65	24	57	24	52	21	54	30	66	38	-
4	38	-	24	61	12	52	14	39	19	51	18	55	25	-
5	29	-	12	49	17	48	22	56	7	58	24	42	21	-
6	25	-	28	59	25	51	19	54	14	47	21	65	31	-
7	28	-	34	77	31	62	37	63	24	64	31	58	21	-
8	50	-	56	130	51	122	54	108	50	162	50	126	60	-
9	50	-	59	158	62	167	61	141	66	148	65	135	45	-
10	53	-	79	158	87	159	81	147	81	181	72	170	64	-
11	84	-	91	192	77	173	92	161	80	203	90	184	70	-
12	87	-	101	174	91	158	79	153	100	184	76	158	52	-
13	62	-	106	168	78	149	83	156	88	161	84	142	84	-
14	69	-	90	154	104	138	104	163	89	159	78	134	78	-
15	80	-	84	170	75	173	71	171	85	180	87	185	89	-
16	77	-	94	186	86	154	90	158	79	200	97	170	95	-
17	76	-	87	165	101	148	77	177	86	182	114	168	83	-
18	79	-	96	190	83	153	88	177	81	200	83	170	68	-
19	42	-	56	117	38	106	49	126	50	130	53	120	55	-
20	70	-	107	178	90	199	66	186	81	210	85	176	97	-
21	87	-	88	154	80	136	76	142	94	160	91	169	69	-
22	70	-	102	146	86	161	71	142	77	164	109	176	92	-
23	64	-	69	124	63	138	80	133	66	129	68	146	73	-
24	60	-	74	93	56	107	57	111	64	107	64	124	63	-
TOTAL	1420	-	1635	3140	1498	2967	1474	2958	1475	3317	1560	3105	1475	-

A Figura 8 mostra a variação das demandas por USAs por dia da semana e por faixa horária. No mesmo sentido, a Figura 9 mostra a variação das demandas por USBs por dia de semana e por faixa horária. Observa-se em complemento ao que é mostrado na Tabela 2 que, o comportamento das demandas durante os dias da semana atinge seu pico na sexta-feira na faixa horária 17 (16:00 horas até 16:59 horas). Enquanto o menor volume de demandas registrado para as USAs foi na quinta-feira na faixa horária 5 (04:00 horas até 04:59 horas).

Figura 8 – Variação das demandas por USAs por dia da semana e faixa horária

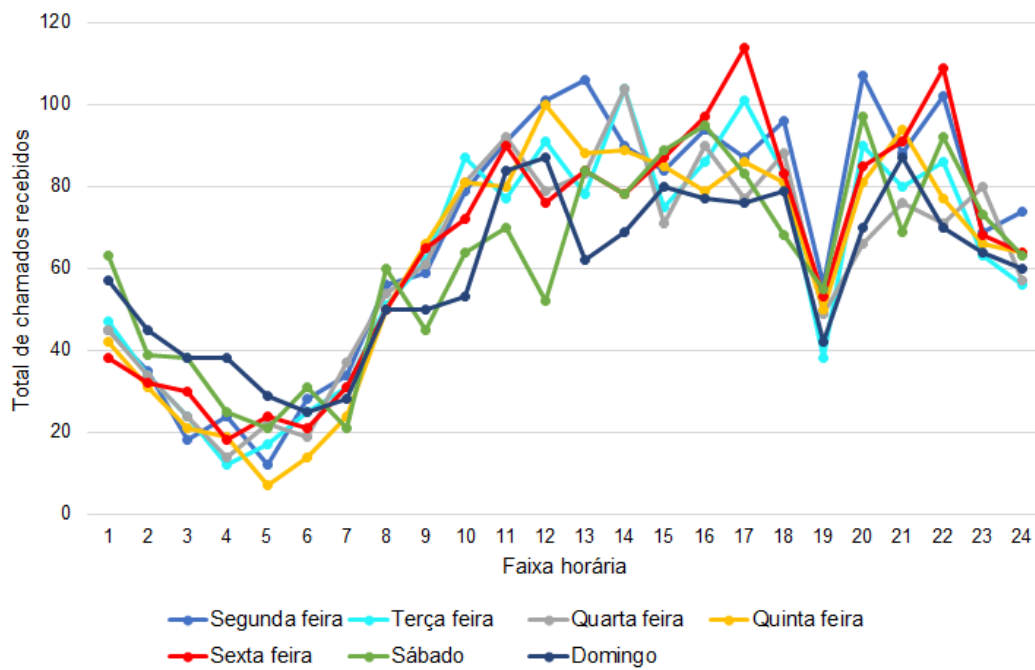
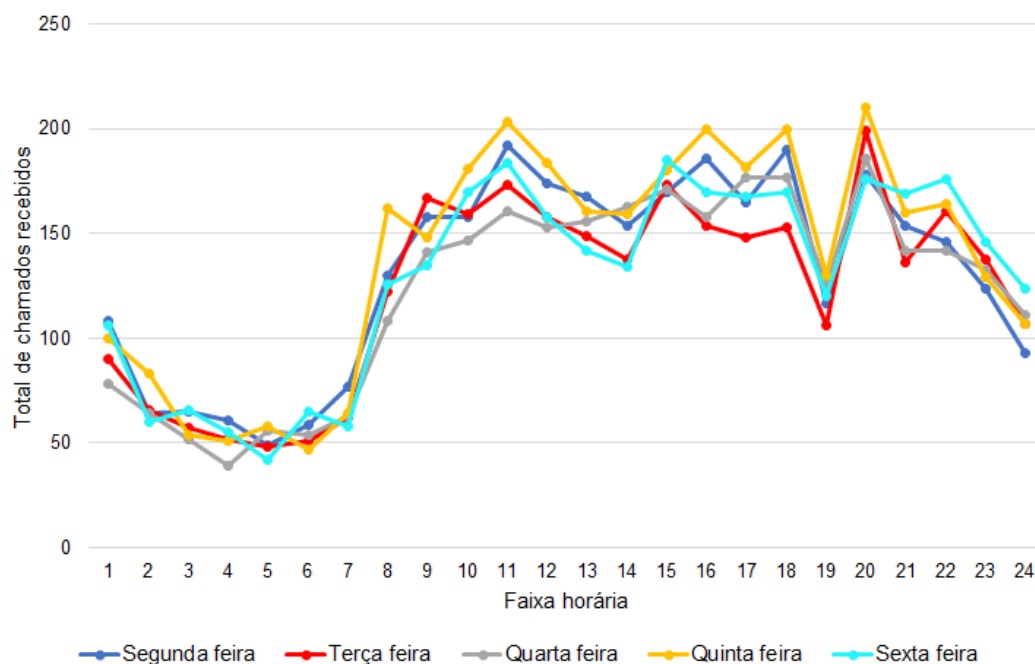


Figura 9 – Variação das demandas por USBs por dia da semana e faixa horária

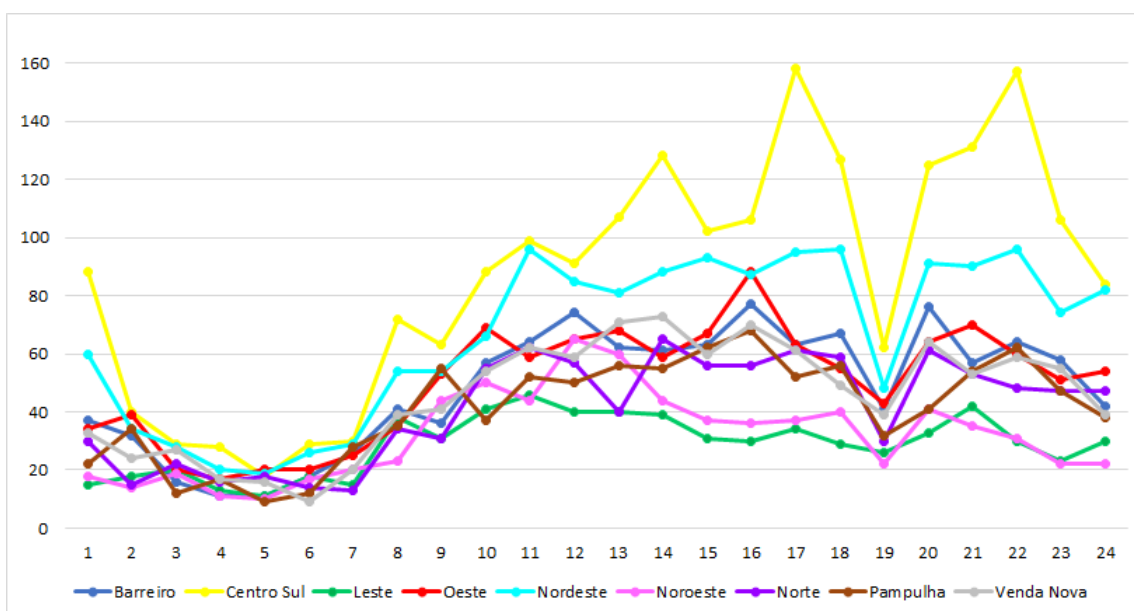


A intenção de se evidenciar as variações da demanda em relação as faixas horárias e dias da semana é mostrar que seria justificável abordar o problema com uma aplicação multiperíodo. Fracionar o dia em multiperíodos permite que cada faixa horária seja tratada como um único problema, recebendo assim uma resolutiva de acordo com o seu comportamento histórico.

Da mesma forma, as variações no número de demandas por faixa horária e regional foram observadas. Tais variações podem reforçar o benefício de se empregar uma abordagem multiperíodo, visto que as regionais podem apresentar diferentes comportamentos, o que pode corroborar com as vantagens de se realocar as ambulâncias. Considerando a divisão de regionais adotada pela cidade de Belo Horizonte, a cidade é dividida em nove regionais: Barreiro, Centro Sul, Leste, Oeste, Nordeste, Noroeste, Norte, Pampulha e Venda Nova.

A Figura 10 mostra o comportamento das demandas por USAs em relação as 24 faixas horárias do dia. Observa-se que para as USAs a regional que gera maior volume de demandas é a Centro Sul. Ao todo, a regional Centro Sul apresentou 2.068 demandas por USAs, sendo seu pico na faixa horária 17 (16:00 horas até 16:59 horas) com 158 registros. Já a regional que apresentou o menor volume de chamados para as USAs foi a Leste, com 693 chamados.

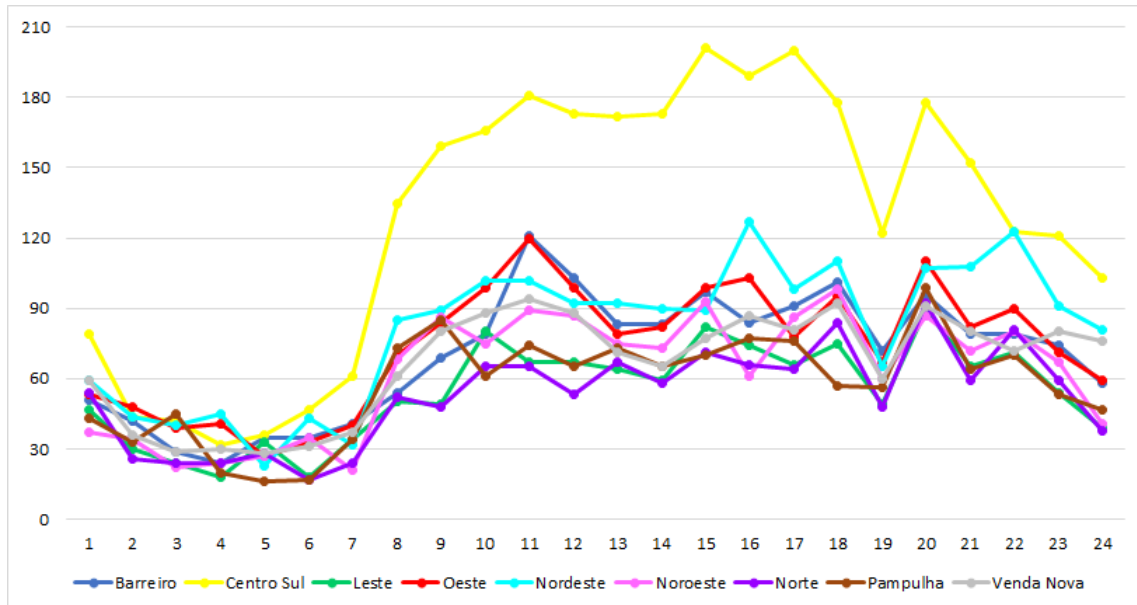
Figura 10 – Variação das demandas por USAs por faixa horária e regional



O comportamento das demandas por USBs em relação as 24 faixas horárias do dia é apresentado na Figura 11. Para as USBs a regional que com maior número de demandas é a também é a Centro Sul. Ao todo, esta regional apresentou 3.067 demandas por USBs (58 % mais demandas do que a segunda colocada do ranking, a regional Nordeste que teve 1.937 registros), sendo seu pico na faixa horária 15 (14:00 horas até 14:59 horas) com 201

chamados. Já a regional que apresentou o menor volume de chamados para as USBs foi a Norte, com 1.267 chamados.

Figura 11 – Variação das demandas por USBs por faixa horária e regional

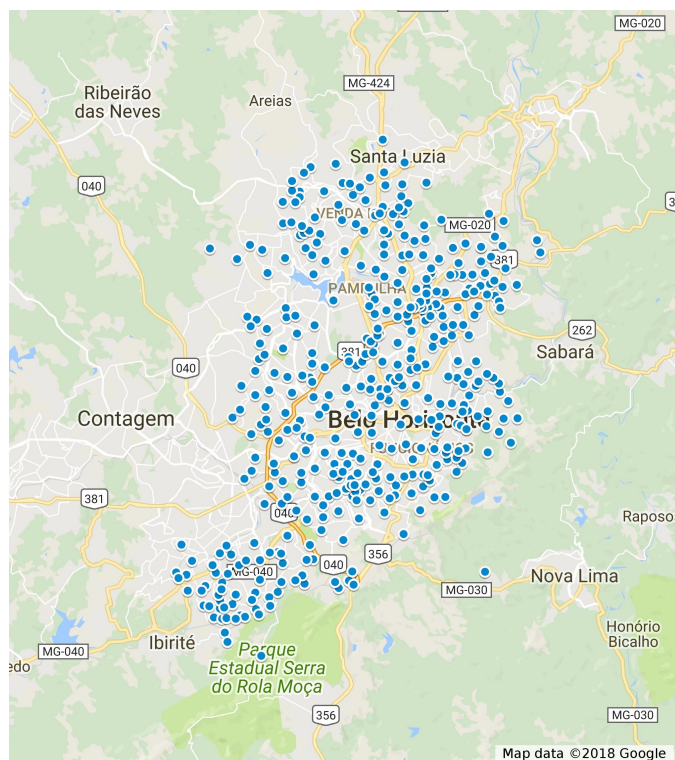


4.2.2 Parâmetros do problema

Para estruturar e executar os modelos de otimização propostos, os parâmetros exibidos na seção anterior são fundamentais. Os parâmetros I , J e d_{ji} serão os mesmos utilizados por Guimarães (2018), por isso, para mais detalhes indica-se a consulta de sua Dissertação. O parâmetro T foi estipulado empiricamente, enquanto os parâmetros U , P_u , Q e S_u seguem às características identificadas no SAMU-BH. Em relação ao parâmetro C_j , segue-se uma recomendação do Ministério da Saúde. Já o parâmetro d_{iu}^t é obtido através do banco de dados.

O conjunto de nós de demanda, I , foi levantado com base nos bairros de Belo Horizonte, de forma que cada bairro fosse discretizado em um ponto de demanda. De acordo com a Prefeitura de Belo Horizonte (2018), a capital mineira possui 492 bairros. Entretanto, o estudo considera 427 bairros (pontos de demanda), pois foram considerados somente aqueles reconhecidos pelo *Google Maps*, uma vez que esta ferramenta foi utilizada para calcular as distâncias geodésicas e tempos de deslocamento. Os 427 pontos de demanda mapeados representam o centro geométrico de cada um dos bairros identificados. A plotagem desses pontos é apresentada na Figura 12.

Figura 12 – Conjunto *I* de nós de demanda. Pontos centrais de 427 bairros da capital mineira



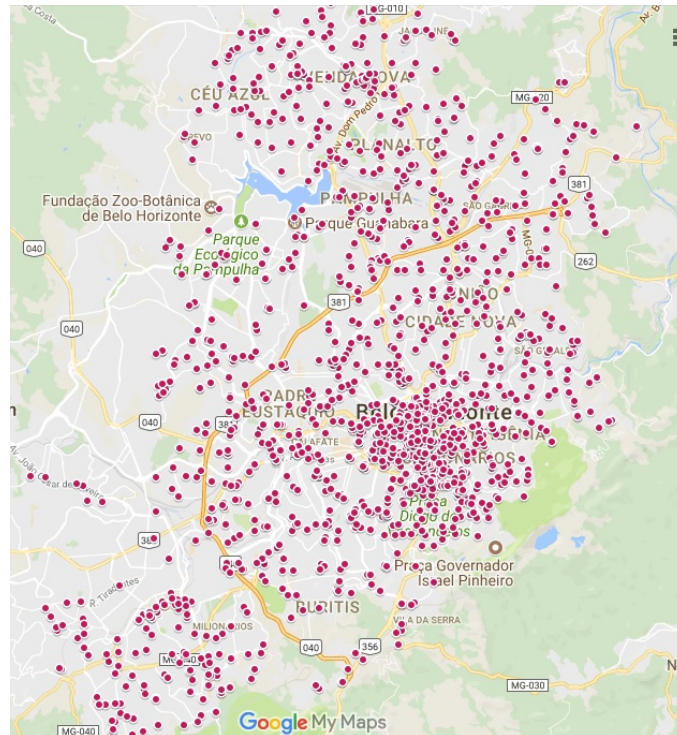
Fonte: Guimarães (2018)

O conjunto de nós candidatos a instalações de bases, *J*, foi definido a partir de um levantamento por empresas e instituições (públicas e privadas) da cidade de Belo Horizonte que possuam estrutura adequada para comportar a instalação da facilidade, conforme previsto pelo Ministério da Saúde (2014). Dentre os pontos candidatos a instalação de bases estão hospitais, centros comerciais, instituições educacionais, estacionamentos, prédios públicos etc. No total, 1.527 candidatos a instalação foram mapeados e são representados na Figura 13.

Os demais parâmetros do problema são resumidamente descritos:

- Conjunto de períodos (*T*): serão considerados 24 períodos, de 1 hora cada, por dia. Este parâmetro foi definido de forma empírica;
- Tipos de ambulância (*U*): o SAMU-BH opera com dois tipos de veículos: USAs e USBs;
- Quantidade de ambulâncias disponíveis (*P_u*): para as configurações de 2019 o SAMU-BH operava com 7 USAs e 21 USBs;
- Tempo crítico de resposta (*S_u*): os tempos críticos de resposta, segundo Guimarães (2018), são definidos pela gerência do SAMU-BH, sendo dez minutos para o empenho das USAs e oito minutos para o empenho das USBs;
- Capacidade de alocação por base (*C_j*): serão consideradas duas unidades por base,

Figura 13 – Conjunto J de nós candidatos a instalação de facilidades. 1527 candidatos espalhados pelo território de Belo Horizonte



Fonte: Guimarães (2018)

- sendo uma de cada tipo u (uma USA e uma USB), de acordo com o conceito de bases descentralizadas apresentado na Portaria 2.657 do Ministério da Saúde (2004);
- Tempos de Resposta (r_{ji}): tempo de deslocamento entre cada nó de facilidade j e cada nó de demanda i , obtido através do *Google Maps*. Mesmo com a possibilidade de variações diárias do tempo de resposta, de acordo com as condições do tráfego, considera-se este indicador de forma única e simplificada pela distância em minutos para condições normais de trânsito. Tal simplificação é justificável uma vez que ambulâncias são veículos que possuem preferência no tráfego e acabam sofrendo menos com os efeitos de congestionamentos;
 - Quantidade de chamados históricos (d_{ju}^t): somatório do número de atendimentos por período em cada bairro j por tipo de ambulância u , conforme o banco de dados. Os chamados considerados totalizam 26.024, sendo 10.537 ocorrências com empenho de USAs e 15.487 de USBs;
 - Fração de ocupação ($b_{iu,k}^t$): calculado conforme a Equação (27), refere-se ao tempo de empenho que cada ponto de demanda i demanda para cada tipo de ambulância u em cada período t dado a instalação de k ambulâncias de um mesmo tipo u dentro da zona de cobertura deste mesmo ponto de demanda i ;
 - Nível de serviço ($q_{iu,k}^t$): calculado conforme a Equação (28), refere-se ao nível de serviço oferecido a cada ponto de demanda i para cada tipo de ambulância u em

cada período t dado a instalação de k veículos para uma fração de ocupação $b_{iu,k}^t$ para este mesmo ponto de demanda i em relação ao tipo de ambulância u no período t .

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os modelos de otimização foram implementados em linguagem de programação C++ e executados pelo *solver* IBM ILOG CPLEX® na versão 12.6.3. Os experimentos foram realizados em um computador HPE Servidor Proliant DL380 Gen9 com processador Intel® Xeon® E5-2630 v4 (2.2GHz/10-core/25MB/85W) com memória de 32GB Dual Rank x4 DDR4-240.

5.1 Análise otimização mono objetivo

Para análise e comparação dos resultados os seguintes cenários foram elaborados:

- Cenário 1 (C1): configuração das bases e ambulâncias conforme vigência em 2019. Neste caso, as variáveis z_j e x_{ju}^t , que determinam a localização das bases e alocação das ambulâncias foram definidas como parâmetros para os modelos FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt;
- Cenário 2 (C2): configuração otimizada de alocação das ambulâncias disponíveis entre as 25 bases em vigência em 2019, tomando-se as variáveis z_j como parâmetro. Otimização por meio dos modelos FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt considerando-se 1 período (cenário de otimização estático);
- Cenário 3 (C3): configuração das bases conforme vigência em 2019, considerando as variáveis z_j como parâmetro, e otimização da alocação/relocação das ambulâncias em multiperíodos (para as formulações FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt). Neste cenário, é introduzido o conceito de realocação de ambulâncias;
- Cenário 4 (C4): configuração otimizada das bases e ambulâncias entre os 1.527 candidatos de forma estática (instância de 1 período) para os modelos FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt;
- Cenário 5 (C5): configuração otimizada das bases entre os 1.527 candidatos a instalação e alocação/relocação das ambulâncias entre os 24 períodos de acordo com a execução para as formulações FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt.

Nos cenários C1, C2 e C3 com a demarcação para que as bases atuais sejam instaladas pelos modelos, naturalmente a Central de Operações do SAMU-BH é uma das bases escolhidas - uma vez que há ambulâncias alocadas neste local. Como se trata de uma central de operações, com uma estrutura mais complexa, optou-se por estabelecer que nos cenários C4 e C5 seria implementada uma restrição que garantisse que a mesma seria uma das bases instaladas. O Quadro 3 detalha a identificação da Central de Operações do

SAMU-BH juntamente com seu endereço.

Quadro 3 – Localização da Central de Operações do SAMU-BH

Base id	Endereço	Regional
5	R. Dom Aristίδes Pôrto, 3 - Coração Eucarístico	Noroeste

A otimização para os cinco cenários propostos e os seus respectivos resultados serão analisados nas seções seguintes, por meio da execução dos modelos FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt. Em sequência, as configurações de instalação de bases e alocação (e/ou realocação) de ambulâncias sugeridas na otimização para estes mesmos cenários são aplicados no simulador permitindo que tais configurações sejam testadas e comparadas.

É importante se retomar aqui que o conceito de cobertura - que será objeto de comparação para todos cenários da otimização e também na simulação - é atribuído ao parâmetro S_u e determina que as demandas por USAs para que sejam consideradas cobertas devem possuir ao menos um veículo deste mesmo tipo alocado em uma base que esteja a no máximo 10 minutos de distância desta mesma demanda. Ao passo que, para que as demandas por USBs sejam consideradas cobertas deve haver ao menos um veículo deste mesmo tipo alocado em uma base que esteja a no máximo 8 minutos de distância desta mesma demanda.

5.1.1 FLEET-ICt - Modelo Determinístico

O total de chamados (26.024) e o número de veículos disponíveis (7 USAs e 21 USBs) é o mesmo para todos os cenários. O número de bases instaladas, o tempo computacional (em segundos), o valor da função objetivo, o número de realocações, a taxa de cobertura USAs, a taxa de cobertura das USBs e a taxa de cobertura total podem variar de acordo com os resultados da execução de cada um dos cinco cenários.

O valor da função objetivo resulta do número máximo de chamados que podem ser considerados cobertos de acordo com as configurações executadas, em cada cenário. As taxas de cobertura das USAs e USBs, expressos em percentual, são obtidas de acordo com o número de chamados cobertos, conforme cada cenário, para cada tipo de ambulância em relação a quantidade de demanda que cada tipo de ambulância produz. Já a taxa de cobertura total é computada comparando-se o valor da função objetivo (número de chamados cobertos) com o total de chamados registrados.

Os resultados dos cinco cenários propostos para o modelo FLEET-ICt são apresentados na Tabela 3. É possível constatar que mesmo mantendo a configuração de localização de bases vigente em 2019 a aplicação das configurações de alocação de ambulâncias sugeridas pelo modelo FLEET-ICt, tanto em sua forma estática (C2) quanto em sua abordagem multiperíodo (C3), podem gerar benefícios em incremento de cobertura ao SAMU-BH. No

caso de se manter as configurações de bases conforme vigência em 2019, os resultados do cenário C3 são os que trazem o maior valor de função objetivo e conseqüentemente maior taxa de cobertura. Tais resultados indicam que é possível melhorar o desempenho do sistema por meio da relocação das ambulâncias entre os períodos.

Tabela 3 – Resultados da implementação dos cenários propostos para o modelo FLEET-ICt

Resultados	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Bases instaladas:	25	25	25	28	226
Tempo computacional (s):	-	0,07	19,33	29,48	2.865,32
Valor da função objetivo:	15.775	18.220	18.355	23.383	23.827
Nº de realocações:	-	-	83	-	508
Taxa de cobertura USAs	52,8%	68,4%	69,7%	77,6%	80,3%
Taxa de cobertura USBs	65,9%	71,1%	71,1%	98,2%	99,2%
Taxa de cobertura total	60,6%	70,0%	70,5%	89,9%	91,6%

De forma similar a comparação entre os cenários C4 e C5, onde otimiza-se simultaneamente a localização das bases e a alocação das ambulâncias, mostra que o valor da função objetivo e a taxa de cobertura podem ser incrementados através da realocação das ambulâncias entre os multiperíodos do dia (C5). Sendo que o cenário C5 é o que alcançou o maior valor de função objetivo (23.827) e maior taxa de cobertura.

Outra análise que a Tabela 3 remete é em relação ao tempo computacional despendido para execução dos cinco cenários. No cenário C1 a execução é realizada somente para cálculo da cobertura, dado a demarcação da localização das bases e a alocação das ambulâncias. Desta forma, o tempo de execução é praticamente nulo. Já no cenário C2, com a localização das bases definidas e com a otimização da alocação das ambulâncias de forma estática, são necessários 0,07 segundos de tempo de execução. Apesar do cenário C3 também partir da localização das bases definida, a alocação/relocação dos veículos entre as bases é inserida ao problema, que passa a ter características dinâmicas. Neste cenário são necessários 19,33 segundos para que o computador forneça os resultados. Considerando a instalação de bases e a alocação das ambulâncias de forma estática o problema leva 29,48 segundos para fornecer resultados, conforme cenário C4. Por fim, para se definir a instalação de bases e alocação/relocação de ambulâncias de forma dinâmica, conforme o cenário C5 é necessário um tempo computacional de 2.865,32 segundos.

Referente ao número de bases instaladas, os cenários C1, C2 e C3 estabelecem que 25 bases sejam instauradas. Sendo estas, as bases que estavam em vigência até 2019. Nos cenários C4 e C5 o modelo sugere que sejam instaladas 28 e 226 bases, respectivamente. No cenário C5 a instalação de um elevado número de bases pode ser interpretado como uma consequência de se tentar maximizar a cobertura nos multiperíodos, uma vez que se

tem 28 ambulâncias disponíveis em 24 períodos o modelo poderia sugerir a instalação de até 672 bases ($28 \times 24 = 672$).

Em relação as realocações, conforme são propostas pelos cenários C3 e C5, é importante tomar-se a quantidade de trocas de bases que a formulação sugere tendo em vista os impactos que esse processo pode gerar ao sistema. No cenário C3 a otimização recomenda 83 realocações ao passo que no cenário C5 508 realocações são propostas. No mesmo sentido que o cenário C5 pode sugerir a instalação de um alto número de bases é de se esperar que quanto mais bases forem instaladas pela solução da otimização maior será o número de realocações a serem realizadas.

5.1.2 LR-MEXCLP-ICt - Modelo Estocástico

Para a otimização por meio do modelo LR-MEXCLP-ICt o total de chamados (26.024) e o número de veículos disponíveis (7 USAs e 21 USBs) também são os mesmos para todos os cenários. O número de bases instaladas, o tempo computacional (em segundos), o valor da função objetivo, a taxa de cobertura USAs, a taxa de cobertura das USBs e a taxa de cobertura total podem variar de acordo com os resultados da execução de cada um dos cenários.

O valor da função objetivo resulta do número de chamados cobertos de acordo com o nível de serviço de cobertura oferecida aos chamados cobertos. As taxas de cobertura das USAs e USBs, expressos em percentual, são obtidas de acordo com o número de chamados cobertos - independente do nível de serviço ofertado, conforme cada cenário, para cada tipo de ambulância. No mesmo sentido, a taxa de cobertura total é calculada comparando-se o número de chamados cobertos - independente do nível de serviço - com o total de chamados do banco de dados.

Tabela 4 – Resultados da implementação dos cenários propostos para o modelo LR-MEXCLP-ICt

Resultados	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Bases instaladas:	25	25	25	27	179
Tempo computacional (s):	-	0,11	404,27	4,87	1.637,02
Valor da função objetivo:	12.855,6	15.011,4	14.742,1	18.607,6	18.757,2
Nº de realocações:	-	-	90	-	449
Taxa de cobertura USAs	52,7%	68,3%	69,4%	77,2%	79,4%
Taxa de cobertura USBs	63,2%	68,7%	67,4%	87,8%	86,5%
Taxa de cobertura total	59,0%	68,5%	68,2%	83,5%	83,6%

Os resultados dos cinco cenários propostos implementados por meio da formulação LR-MEXCLP-ICt são apresentados na Tabela 4. Para os cenários em que se mantêm a

configuração de bases vigente em 2019 (C1, C2 e C3) é possível notar que a otimização por meio do modelo LR-MEXCLP-ICt proporciona o maior valor de função objetivo e também maior taxa de cobertura total no cenário em que o problema é tratado de forma estática, sem realocação (C2). Além disso, a comparação da taxa de cobertura alcançada para demandas por USAs e USBs nos cenários C2 e C3 indica que com a proposta de alocação/realocação resultante do cenário C3 é possível se alcançar uma taxa de cobertura maior para as demandas por USAs, entretanto o cenário C2 promove uma taxa de cobertura maior para as demandas por USBs e também uma taxa de cobertura total superior a do cenário C3.

Em contraste, a comparação entre os cenários C4 e C5 mostra que o valor da função objetivo e a taxa de cobertura total podem ser ampliados por meio da realocação das ambulâncias que é proposta pelo cenário C5 para os multiperíodos do dia. Sendo o cenário C5 responsável por promover o maior valor de função objetivo (18.757,2) e a maior taxa de cobertura total (83,6%). Todavia, observa-se que no cenário C4 as configurações de alocação (estáticas) podem gerar uma taxa de cobertura para as demandas por USBs maior do que a proporcionada pelo cenário C5.

Em relação ao tempo computacional despendido na execução dos cinco cenários para esta formulação, observa-se que os cenários que implementam configurações de realocação são os que demandam mais esforços computacionais. No cenário C1 a execução é realizada para cálculo da cobertura, dado a demarcação da localização das bases e a alocação das ambulâncias, sendo o tempo de execução é praticamente nulo. Partindo da localização das bases definidas, conforme o cenário C2, são necessários 0,11 segundos para que os resultados das configurações de alocação dos veículos entre as bases sejam obtidos. Com a localização das bases definidas, conforme o cenário C3, são necessários 404,27 segundos para que os resultados das configurações de alocação/realocação das ambulâncias nos multiperíodos sejam obtidos. Considerando a instalação de bases e a alocação das ambulâncias de forma estática o problema leva 4,87 segundos para fornecer resultados, conforme cenário C4. Por último, no cenário C5 para se definir a instalação de bases e alocação/realocação de ambulâncias de forma dinâmica é necessário um tempo computacional de 1.637,02 segundos.

No que concerne ao número de bases instaladas, para os cenários C4 e C5 o modelo LR-MEXCLP-ICt propõe a instalação de 27 e 179 bases, respectivamente. Da mesma forma que explicado anteriormente, o elevado número de bases sugeridos na otimização para o cenário C5 pode ser interpretado como uma consequência de se tentar maximizar a cobertura nos multiperíodos, uma vez que se tem 28 ambulâncias disponíveis em 24 períodos a formulação poderia recomendar a instalação de até 672 bases ($28 \times 24 = 672$). Já o número de realocações, observa-se que no cenário C3 são recomendados 90 trocas de base. Enquanto que, para o cenário C5 449 realocações são impostas.

Com o objetivo de maximizar a cobertura do sistema levando-se em conta o nível de

serviço oferecido, o modelo LR-MEXCLP-ICt traz resultados de cobertura para diferentes níveis, conforme mostra a Tabela 5. Isto é, as demandas podem receber cobertura de diferentes níveis de serviço, ou seja, com mais ou menos ambulâncias dentro de sua zona de cobertura. Conforme o banco de dados, são 10.537 registros de demandas por USAs e 15.487 demandas por USBs.

Tabela 5 – Diferentes níveis de cobertura conforme o modelo LR-MEXCLP-ICt

Cobertura para os k níveis de serviço:	C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
$k = 3$ USA	71	0	0	0	0
$k = 2$ USA	992	843	910	793	846
$k = 1$ USA	4.492	6.357	6.405	7.344	7.524
Total de chamados USA cobertos	5.555	7.200	7.315	8.137	8.370
$k = 3$ USB	2.958	2.342	2.565	2.232	2.131
$k = 2$ USB	2.713	3.850	3.898	6.539	7.256
$k = 1$ USB	4.126	4.447	3.977	4.830	4.010
Total de chamados USB cobertos	9.797	10.639	10.440	13.601	13.397

Tanto para as demandas por USAs quanto para as demandas por USBs o cenário C1 é o que oferece maior número de chamados cobertos para o nível de serviço com 3 ambulâncias disponíveis para determinado (s) ponto (s) de demanda. Entretanto este cenário é o que proporciona o menor número de chamados cobertos no total e o menor valor de função objetivo. Para o nível de serviço que dispõe de 2 ambulâncias para a cobertura de certo (s) ponto (s) de demanda, o cenário C1 é o que oferece maior número de demandas cobertas para chamados demandando por USAs. Para as USBs o cenário C5 é o que alcança o maior número de demandas cobertas por um nível de serviço $k = 2$. Considerando o nível de serviço $k = 1$ o maior número de chamados cobertos para as USAs foi encontrado no cenário C5. Para este mesmo nível de serviço o cenário C4 é o que proporciona o maior número de demandas por USBs cobertas.

Em número absoluto de chamados cobertos o cenário C5 é o que alcança os melhores resultados. Sendo 8.370 chamados cobertos para as demandas USAs e 13.397 chamados cobertos para as demandas USBs. É importante constatar que, os indicadores de nível de serviço para a cobertura, resultantes da formulação LR-MEXCLP-ICt, podem trazer uma reflexão mais detalhada para o processo decisório. É necessário que além dos valores de função objetivo e taxa de cobertura conforme são mostrados na Tabela 4 os níveis de serviço obtidos também sejam levados em conta.

A mensuração do nível de serviço conforme propõe o modelo LR-MEXCLP-ICt e a sua conseqüente análise podem contribuir para evidenciar que, para oferecer uma cobertura mais qualificada às demandas o número de ambulâncias e/ou bases precisam

ser incrementados. Isto é destacado pela abordagem que esta formulação dá ao problema, visando não somente cobrir demandas mas também proporcionar uma cobertura mais conceituada às mesmas (com mais ambulâncias em sua zona de cobertura). Ou seja, proporcionar cobertura as demandas considerando a taxa de ocupação que os pontos de demanda geram.

5.2 Análise Multiobjetivo

Com o intuito de se expandir o uso da ferramenta de otimização apresentada com os modelos mono objetivo FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt a aplicação da abordagem biobjetivo proposta visa disponibilizar um incremento às formulações, de forma que ao mesmo tempo que se busque maximizar a cobertura dos chamados seja também um objetivo a minimização do número de recursos (bases) utilizados.

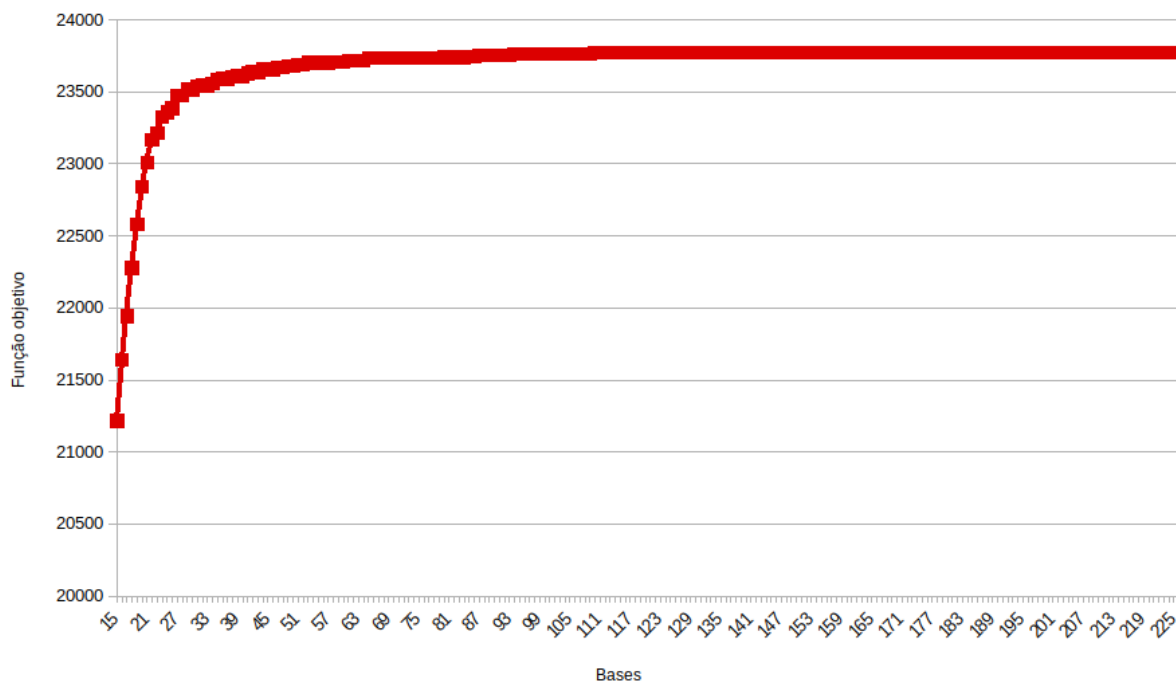
Tanto no modelo FLEET-ICt quanto no modelo LR-MEXCLP-ICt emprega-se uma restrição que limita o número máximo de veículos alocados em uma base (Equação (22) e Equação (33), respectivamente). Além disso, considerando os parâmetros adotados, cada base pode alocar no máximo 2 veículos. Intuitivamente, partindo deste ponto definiu-se que o número mínimo de bases necessárias para alocar as 28 ambulâncias disponíveis no sistema é 14. Desta forma, o valor inicial de ϵ para as duas formulações é 14.

Para definir o valor máximo de ϵ para cada formulação o critério adotado foi em relação ao número de bases proposto pela solução ótima obtida pelo cenário C5 de cada modelo. Sendo assim, o valor final de ϵ para a formulação FLEET-ICt é 226 e para a formulação LR-MEXCLP-ICt é 179.

Conforme detalhado na Figura 14, a otimização por meio do modelo FLEET-ICt indica que, para que a quantidade de chamados cobertos seja incrementado é necessário que o número de bases instaladas também seja incrementado. Sendo que o objetivo da segunda função objetivo é minimizar o número de bases instaladas não é possível melhorar o número de chamados cobertos sem degradar a mesma.

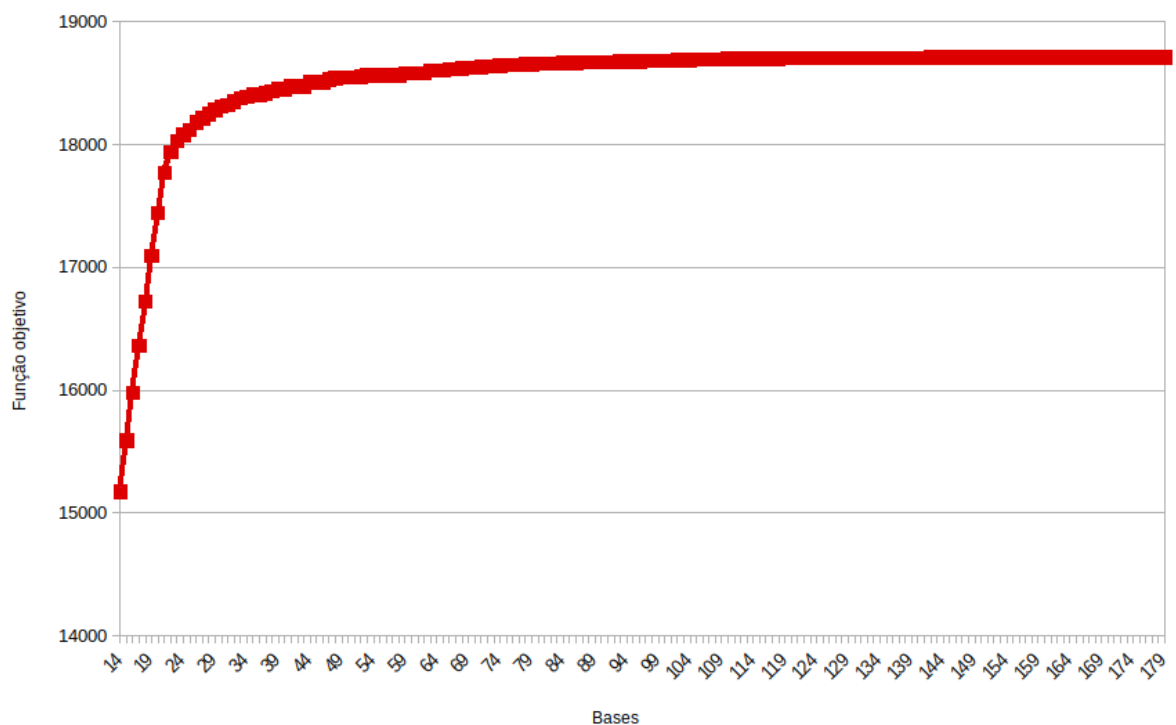
Observa-se também que, a partir de um certo número de bases instaladas (28), o valor da função objetivo que maximiza a quantidade de chamados cobertos passa a ter incrementos relativamente menores. Sendo que, para 28 bases instaladas o modelo alcança um valor de função objetivo igual a 23.476 ao passo que para 226 bases o valor de função objetivo atingido é de 23.775, que representa um incremento de menos de 1,3%.

Figura 14 – Análise multiobjetivo para a formulação FLEET-ICt



A Figura 15 mostra os resultados da aplicação biobjetivo do modelo LR-MEXCLP-ICt, que segue um comportamento similar aos descritos para a formulação biobjetivo do modelo FLEET-ICt.

Figura 15 – Análise multiobjetivo para a formulação LR-MEXCLP-ICt



Com a formulação LR-MEXCLP-ICt ao se atingir um valor de 30 bases instaladas os valores de função objetivo passam a ter incrementos relativamente menores. Sendo que, para 30 bases a função objetivo atinge o valor de 18.308,54 ao passo que para 179 bases instaladas o valor da função objetivo chega em 18.757,2, o que representa um incremento de apenas 2,45%.

No entanto, em ambos os casos, mesmo que se trate de um percentual de incremento relativamente pequeno, é importante citar que tratam-se de demandas médicas emergenciais e que qualquer tipo de incremento em chamados cobertos dentro de tempos de resposta satisfatórios devem ser levados em conta.

Para a resolução do problema biobjetivo proposto o método de escalarização P_ϵ foi capaz de gerar soluções eficientes e também possibilitou que todos os pontos da Curva de Pareto fossem obtidos. Tendo em ciência que um alto número de bases pode se tornar algo indesejável e custoso para o SAMU-BH o emprego da abordagem biobjetivo conforme aplicado mostra-se um incremento as ferramentas apresentadas para o auxílio no processo decisório envolvido.

5.3 Análise por meio da Simulação

A aplicação das duas formulações tanto em suas formas mono objetivo quanto biobjetivo demonstram-se ferramentas úteis para auxiliar no processo decisório do SAMU-BH. Em complemento ao uso dos modelos de otimização FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt o emprego do simulador traz um acréscimo a presente pesquisa e também ao processo decisório envolvido. Por meio do simulador é possível comparar as diferentes abordagens dos modelos de otimização e também analisar inúmeros cenários que podem vir a ser propostos. Nesta seção as configurações obtidas na otimização para os cinco cenários propostos no início deste capítulo serão analisados por meio da simulação.

Todavia é indispensável mencionar que, uma vez que tratam-se de abordagens diferentes - otimização e simulação - é esperado que os resultados possam indicar inferências diferentes daquelas obtidas na etapa de otimização. Isso se deve ao fato de que o simulador contempla objetivos que não são considerados na otimização. Enquanto os modelos de otimização têm o objetivo de maximizar a cobertura dos chamados dentro de tempos de resposta satisfatórios, o simulador leva em conta as filas, as reposições e ambulâncias que precisam atender demandas fora de sua zona de cobertura. Ou seja, o simulador dá ao problema uma abordagem mais realística.

A partir da geração das instâncias para cada um dos cenários as rodadas de simulação foram executadas. Cada instância gerada para a simulação possui 7.392 chamados, sendo 6.456 demandas por USBs e 936 demandas por USAs. Além disso, a geração de cada instância baseia-se na configuração de localização de bases, alocação e/ou realoca-

ção de ambulâncias conforme sugerido em cada um dos cenários C1, C2, C3, C4 e C5. A Tabela 6 traz um resumo dos resultados obtidos por meio da simulação em relação ao percentual de chamados cobertos.

Tabela 6 – Resumo dos resultados da simulação

Cenário	Modelo	% de chamados cobertos USA	% de chamados cobertos USB
C1	SAMU-BH	32,2%	40,8%
C2	FLEET-ICt	36,5%	41,8%
C2	LR-MEXCLP-ICt	39,9%	42,6%
C3	FLEET-ICt	41,6%	43,7%
C3	LR-MEXCLP-ICt	43,3%	44,6%
C4	FLEET-ICt	45,5%	46,4%
C4	LR-MEXCLP-ICt	47,0%	52,0%
C5	FLEET-ICt	43,5%	44,7%
C5	LR-MEXCLP-ICt	44,0%	51,5%

Para a análise dos resultados da simulação, tal qual na otimização, o foco consiste na avaliação do percentual dos chamados que foram cobertos dentro do tempo de resposta definido para cada cenário. Buscou-se avaliar também o intervalo de tempo entre o recebimento de um chamado e a chegada da ambulância ao local do incidente - tempo de resposta (TR) - médio para cada tipo de ambulância, conforme é mostrado na Tabela 7 e na Tabela 8. A análise do TR em conjunto com a quantidade de chamados cobertos deve-se ao fato de se tratar de um indicador constantemente considerado em estudos em EMS e estar diretamente ligado ao conceito de cobertura.

Tabela 7 – Resumo dos resultados da simulação em relação ao tempo de resposta das USAs

Cenário	Modelo	TR médio USA (minutos)	Desvio Padrão (minutos)
C1	SAMU-BH	13,92	7,12
C2	FLEET-ICt	12,92	6,33
C2	LR-MEXCLP-ICt	12,86	5,96
C3	FLEET-ICt	12,27	5,80
C3	LR-MEXCLP-ICt	12,27	5,62
C4	FLEET-ICt	12,20	4,64
C4	LR-MEXCLP-ICt	12,19	4,57
C5	FLEET-ICt	12,28	5,13
C5	LR-MEXCLP-ICt	12,25	5,05

Comparando os resultados da simulação do cenário C1 com os resultados da simulação dos cenários C2 e C3 (otimizados pelas duas formulações - nas formas estática e multiperíodo) observa-se que, se mantidas as bases que estavam em vigência até 2019 e

se inseridas as configurações de alocação e/ou realocação propostas na otimização (pelos modelos FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt) é possível melhorar o desempenho do sistema tanto em número de chamados cobertos quanto em relação ao tempo de resposta médio para o atendimento dos chamados. Este comportamento pode ser notado no desempenho das ambulâncias tipo USA e também tipo USB. A Figura 16 e Figura 17 corroboram com esta análise, evidenciando a evolução do número de chamados cobertos entre os cenários C1, C2 e C3.

Tabela 8 – Resumo dos resultados da simulação em relação ao tempo de resposta das USBs

Cenário	Modelo	TR médio USB (minutos)	Desvio Padrão (minutos)
C1	SAMU-BH	10,43	5,27
C2	FLEET-ICt	10,34	5,16
C2	LR-MEXCLP-ICt	10,20	5,14
C3	FLEET-ICt	10,07	5,11
C3	LR-MEXCLP-ICt	9,82	5,00
C4	FLEET-ICt	9,06	4,69
C4	LR-MEXCLP-ICt	8,73	4,65
C5	FLEET-ICt	9,24	4,88
C5	LR-MEXCLP-ICt	8,90	4,77

Também é possível observar que, nestes casos as configurações de alocação e realocação propostas por meio da formulação LR-MEXCLP-ICt são as que apresentam melhor desempenho tanto para as demandas por USAs quanto para as demandas por USBs. Com estas configurações implementadas no simulador foi possível cobrir 405 do total 936 chamados por USAs dentro do tempo de resposta de 10 minutos e 2.879 do total de 6.456 chamados por USBs dentro do tempo de 8 minutos.

Figura 16 – Quantidade de chamados cobertos USA para os cenários C1, C2 e C3

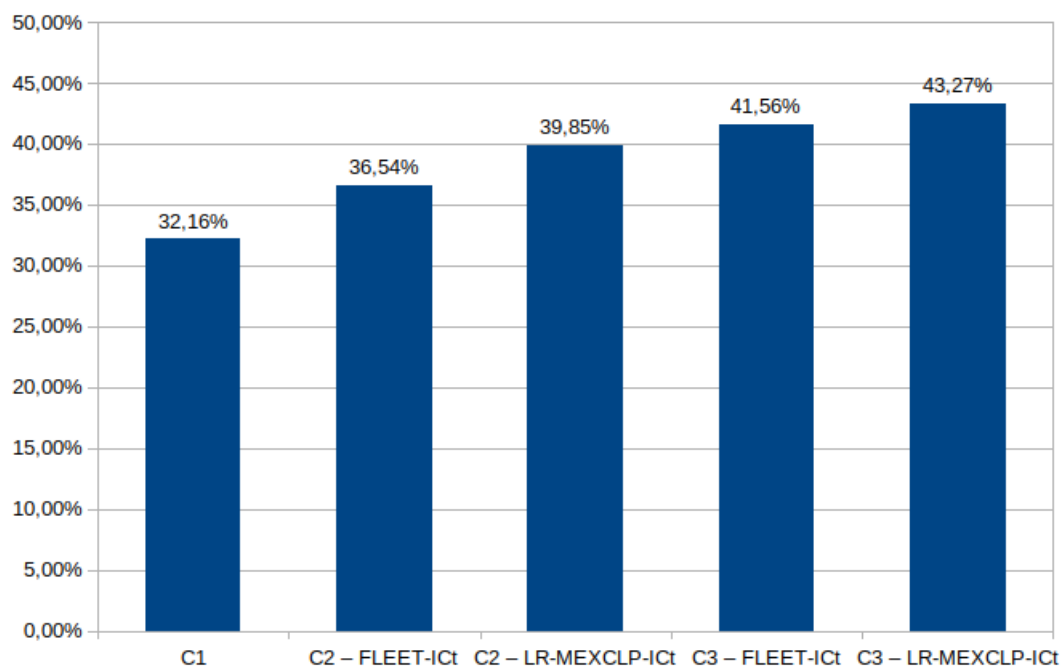
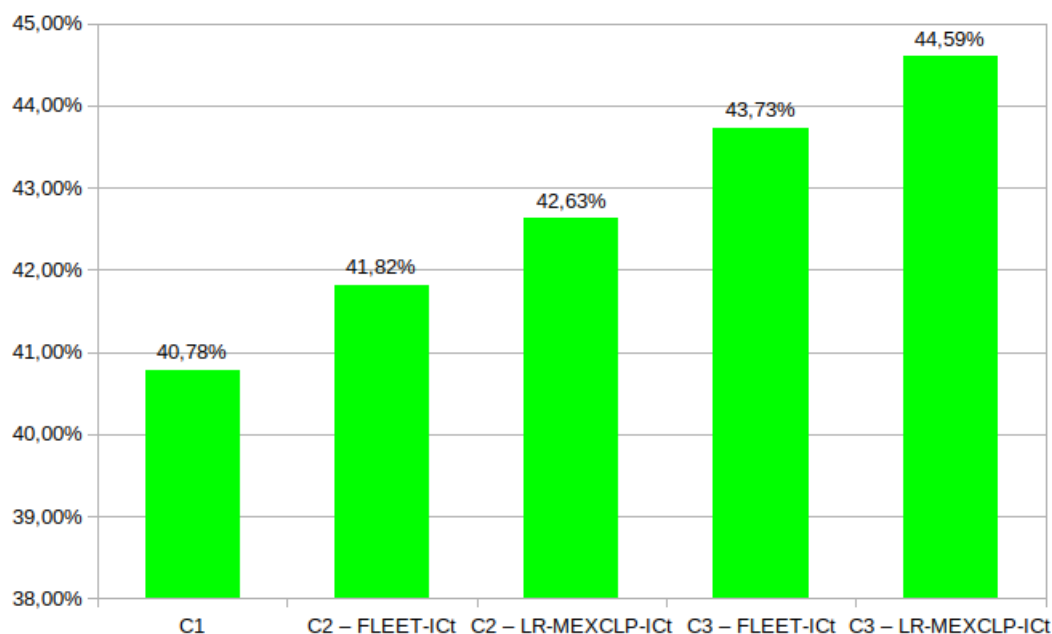


Figura 17 – Quantidade de chamados cobertos USB para os cenários C1, C2 e C3



Por meio da análise dos resultados simulados para os cenários C4 (FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt em sua versão estática) e C5 (FLEET-ICt e LR-MEXCLP-ICt em sua versão multiperíodo) constata-se que as localizações de base recomendadas pelos dois modelos podem proporcionar um desempenho melhor do que os cenários em que as bases consideradas em vigência foram demarcadas. Novamente os dois tipos de ambulância seguiram o mesmo comportamento. Entretanto, diferente dos resultados obtidos na otimização, os

resultados indicados na simulação mostram que para o cenário C5 tanto para as configurações sugeridas pelo modelo FLEET-ICt quanto para as configurações recomendadas pela formulação LR-MEXCLP-ICt não são as que apresentam o melhor desempenho. Estes resultados são evidenciados na Figura 18 e na Figura 19.

Figura 18 – Quantidade de chamados cobertos USA para cada cenário

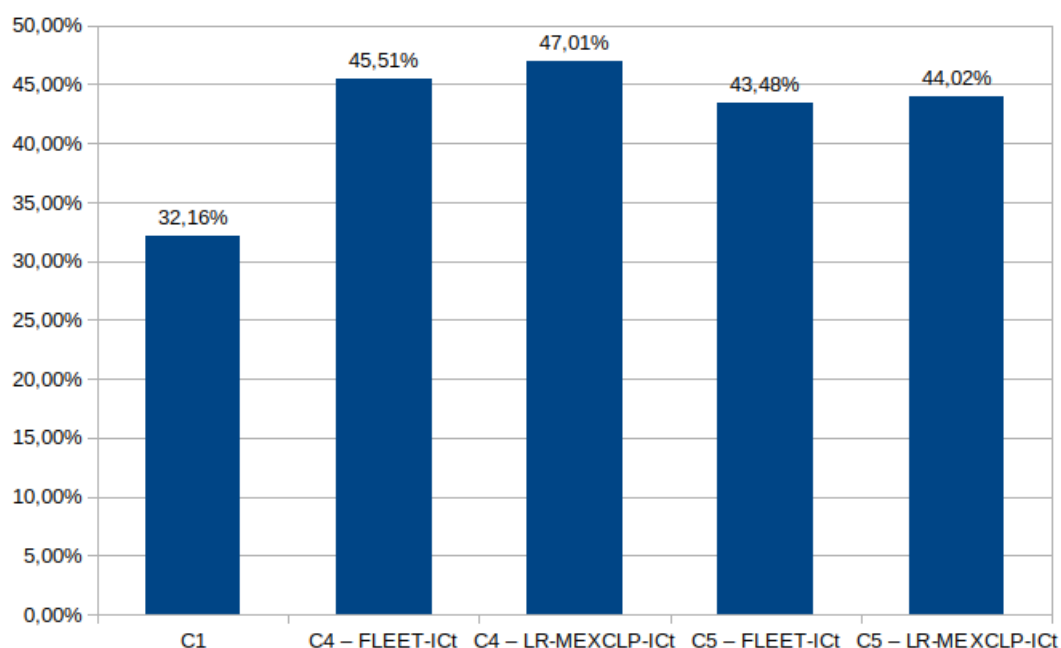
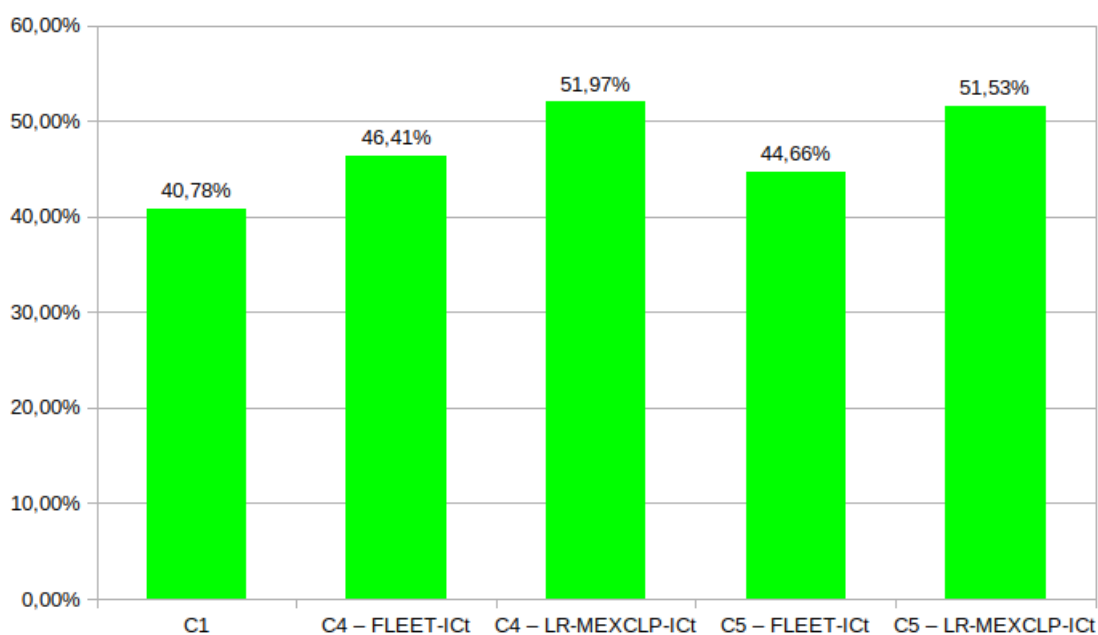


Figura 19 – Quantidade de chamados cobertos USB para cada cenário



Tal comportamento pode ser notado para as demandas pelo tipo de ambulância USA e pelo tipo de ambulância USB. Em ambos os casos o cenário que apresenta melhores

resultados em relação a quantidade de chamados cobertos e em relação ao TR médio é o cenário C4 com as configurações sugeridas pela formulação LR-MEXCLP-ICt em sua versão estática. Com os resultados da simulação não é possível inferir que as configurações de realocação propostas na versão multiperíodo dos dois modelos seja vantajosa.

Nesta seção, a geração de uma “história artificial” do sistema de operação do SAMU-BH por meio da aplicação do simulador permitiu que fossem feitas inferências sobre as diferentes configurações otimizadas, comprovando sua utilidade em combinação com a Programação Matemática. A integração das duas metodologias permitiu que as configurações ótimas propostas pelos dois modelos de otimização fossem testadas e comparadas. Sendo que, a análise dessas configurações, através da Simulação, indica que a abordagem da formulação LR-MEXCLP-ICt pode ser capaz de proporcionar um melhor desempenho ao sistema do SAMU-BH.

5.4 Análise e discussão

A aplicação dos dois modelos de otimização em conjunto com a Simulação ratificam a validade de se empregar ferramentas da Pesquisa Operacional para auxiliar o processo decisório em um EMS em relação a localização de bases e alocação de ambulâncias. O foco desta pesquisa foi evidenciar o problema e os modelos matemáticos propostos, explorando as principais características de cada uma das formulações de forma a mostrar que as mesmas podem ser aplicadas como ferramentas de suporte a tomada de decisão.

Os modelos de otimização implementados nesta pesquisa são derivados de formulações que tratam o problema de localização de facilidades com a abordagem de máxima cobertura e têm seu objetivo basicamente direcionado a maximizar o número de demandas cobertas em multiperíodos dentro de um tempo de resposta predefinido. Tais formulações buscam responder questões como: *i)* quantas bases devem ser instaladas? *ii)* onde cada base deve ser localizada? *iii)* como a demanda pelos serviços deve ser alocado às bases em cada período? *iv)* como as ambulâncias devem ser alocadas às bases instaladas em cada período?

O modelo FLEET-ICt utiliza parâmetros previstos dentro de valores específicos e, portanto, é caracterizado como determinístico. Tal formulação é inspirada nos trabalhos de Schilling et al. (1979) e Guimarães (2018). O modelo LR-MEXCLP-ICt é inspirado nos trabalhos de Daskin (1983) e Sorensen e Church (2010), sendo que trata-se de um modelo estocástico que é capaz de considerar um conjunto de possíveis cenários futuros para parâmetros incertos. Em acréscimo, os dois modelos são dinâmicos e consideram diferentes períodos de tempo com variação de dados ao longo desses períodos. Sendo assim, capazes de fornecer soluções para cada período de acordo com suas diferentes condições.

A aplicação do modelo FLEET-ICt implica que deve-se assumir que as ambulâncias

estarão sempre disponíveis quando solicitadas. Tal consideração pode ser observada como uma limitação, uma vez que as ambulâncias ficam indisponíveis sempre que estão em situações de atendimento. Sendo assim, considerá-las sempre disponíveis superestima a capacidade das mesmas, ao passo que pontos de demanda com grande volume de chamados ficarão grande parte do tempo descobertos uma vez que o modelo priorizará a instalação de uma única ambulância cobrindo o maior número de demandas possível seja qual for a intensidade desta demanda.

A aplicação do LR-MEXCLP-ICt também exige que simplificações sejam tomadas. É importante perceber que, utilizar o conceito de fração de ocupação para cada um dos pontos de demanda exige que, se considere que as ambulâncias atenderão apenas chamados dentro de sua zona de cobertura, ou seja, dentro de sua zona de serviço. Isto nem sempre representa a realidade da melhor maneira, uma vez que as ambulâncias podem atender livremente chamados em qualquer ponto, mesmo que fora de sua zona de cobertura, desde que sejam a melhor opção para o atendimento. Entretanto, tal simplificação é inerente a maioria dos modelos de cobertura e também está presente na formulação FLEET-ICt.

É necessário frisar que tanto os modelos de otimização quanto o simulador simplificam outras questões operacionais que são relevantes ao sistema. Por exemplo, as variações e transtornos normalmente impostas por condições de tráfego em grandes cidades. Outros aspectos como a manutenção dos veículos e condições básicas de jornada de trabalho dos profissionais que operam no sistema também não são abordados no problema e devem ser consideradas pelos tomadores de decisão.

Os resultados encontrados na otimização indicam a validade de se discutir uma proposta multiperíodo para o sistema do SAMU-BH. Sendo que, para as duas formulações o maior valor de função objetivo e também de taxa de cobertura total foram obtidas pelo cenário C5, onde a localização das bases e alocação/realocação das ambulâncias foi tratada de forma dinâmica. Entretanto, para se alcançar tais resultados um número considerável de bases a serem instaladas e de realocações a serem feitas foram recomendado em ambos casos.

Uma vez que o SAMU deve fornecer o melhor serviço possível ao público de forma eficaz é importante que o processo decisório avalie questões como o número de bases propostas e/ou o número de realocações necessárias. Neste sentido, para o caso em que a instalação de muitas bases seja algo indesejável, foi demonstrado que a abordagem biobjetivo sugerida pode incrementar a ferramenta e assim contribuir com o processo decisório em questão. Todavia, a abordagem proposta não trata a questão da quantidade de realocações que são demandadas.

Destaca-se também a comparação dos dois modelos de otimização por meio da técnica de simulação. Enquanto a otimização demonstra que é possível aumentar a quantidade de chamados cobertos quando se opta pela política de realocação de ambulâncias, os

resultados da simulação não seguem os mesmos padrões. Através desta análise verifica-se que as configurações de instalação de bases e alocação de ambulâncias de forma estática são as que podem proporcionar o melhor desempenho ao sistema. Sendo que, nesta etapa o modelo estocástico LR-MEXCLP-ICt em sua versão estática foi o que forneceu configurações com melhores resultados em quantidade de chamados cobertos e em tempo de resposta médio.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Problema de Localização de Máxima Cobertura foi a referência utilizada para o desenvolvimento de modelos matemáticos que podem contribuir para o processo decisório do SAMU-BH em relação a instalação de bases e alocação/relocação de ambulâncias. Neste sistema, em contraste com os recursos limitados têm-se o objetivo de maximizar a cobertura da demanda ao otimizar a localização das facilidades disponíveis para que elas consigam servir o maior número de chamados possível.

Com os resultados é possível responder a pergunta de pesquisa levantada neste trabalho: como a aplicação de ferramentas da Pesquisa Operacional podem auxiliar o processo de tomada de decisão do SAMU-BH em relação a localização de bases e alocação de ambulâncias? Os resultados conduzem a uma análise que evidencia a necessidade por um olhar mais detalhado sobre os aspectos decisórios que acercam o problema. É importante que os gestores do SAMU-BH considerem os benefícios obtidos em ganho nas taxas de cobertura nos cenários otimizados. A inserção do conceito de realocação ao sistema e/ou a otimização da localização das bases pode trazer incrementos em cobertura sem a necessidade de se empenhar recursos na compra de novas ambulâncias.

Entretanto, embora os resultados obtidos na otimização indiquem que a realocação de ambulâncias e a instalação de novas bases podem significar um meio interessante para elevar o nível de cobertura, é fundamental perceber que o investimento em novas bases e os movimentos das ambulâncias entre as bases vão gerar custos. Além disso, as realocações dos veículos entre as bases podem gerar consequências do ponto de vista dos recursos humanos (equipes), uma vez que pode influenciar a movimentação das equipes e interferir no tempo de descanso entre os atendimentos.

Outro aspecto importante para o processo decisório refere-se ao fato de que o SAMU-BH deve estar preparado não apenas para emergências diárias e rotineiras. É importante que o sistema tenha capacidade de absorver impactos causados por eventos anormais (por exemplo, tragédias em massa e desastres naturais), que podem causar grandes reduções na disponibilidade de ambulâncias. Além do mais, como indica o banco de dados, o SAMU-BH atende ocorrências de cidades vizinhas a Belo Horizonte, cita-se registros de ocorrências em cidades como Betim, Contagem, Nova Lima, Ribeirão das Neves, Sabará, Santa Luzia, Sete Lagoas, Vespasiano, dentre outras. Tal tipo de circunstância também pode desfalcar a cobertura do serviço na capital mineira. Para amenizar os inconvenientes que situações como estas podem causar ao SAMU-BH, pode ser inevitável que sejam necessários recursos extras que permitam o sistema operar com certa folga, de acordo com o impacto que cada adversidade pode suscitar.

Em acréscimo, alguns questionamentos devem surgir: O problema da localização das bases e alocação/realocação das ambulâncias é o único gargalo do sistema? Até que nível de serviço para a cobertura das demandas os recursos públicos podem arcar? As configurações da otimização que possibilitam aumentar o percentual de cobertura são viáveis? O que pode ser considerado como “viável” quando se trata de um serviço tão crítico como este? Quais outros objetivos podem ser incluídos na otimização?

Diante disso, percebe-se que a aplicação de modelos de otimização para tratar do problema localização de bases e alocação/realocação de ambulâncias podem auxiliar o processo de tomada de decisão no SAMU-BH, fornecendo resultados que permitem a comparação de diferentes configurações de operação em cenários distintos. Tais resultados podem ser ponderados com outras questões do processo decisório e, desta forma, fornecer base a decisão dos gestores.

Sob essa ótica, espera-se que esta pesquisa traga reflexões e contribuições em três vertentes. Primeiramente, que se possa atender a questões sociais, tendo em vista que a redução do tempo de resposta das ambulâncias pode impactar na gravidade da situação de vítimas de incidentes médicos, inclusive salvando a vida desses indivíduos. Segundo, que no âmbito governamental seja possível contribuir ao processo decisório do SAMU-BH, maximizando a qualidade do serviço e a utilização dos recursos públicos. Por fim, tem-se o anseio que se possa acrescentar contribuições científicas aos estudos relacionados a localização de EMSs, de forma que a literatura possa seguir em evolução, orientando pesquisas futuras. Especialmente em relação ao SAMU-BH, seguindo os avanços que vêm sendo propostos ao longo dos anos nos estudos de Silva (2010), Junior (2011), Pinto, Silva e Young (2015), Nogueira, Pinto e Silva (2016), Guimarães (2018) e Guimarães e Martins (2018).

Para trabalhos futuros, sugere-se que se busquem melhorias na coleta de dados, de forma que seja possível trabalhar com informações mais precisas. Sugere-se também a solução do problema de forma mais realística, por exemplo, permitindo que as demandas possam ser originadas de qualquer ponto do território em vez de centróides como foi feito na otimização. Outro exemplo de melhoria seria considerar também para os multiperíodos as variações nas condições de tráfego.

Em relação as formulações propostas, recomenda-se que outros objetivos possam ser incluídos, de acordo com as necessidades que tangem o sistema e englobam o processo decisório. Sugere-se também a aplicação de uma heurística matemática para que seja possível obter soluções em um tempo computacional reduzido, de forma que abordagens multiobjetivo fornecem resultados com maior agilidade.

Referências

- ABOUELJINANE, L.; SAHIN, E.; JEMAI, Z. A review on simulation models applied to emergency medical service operations. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 66, n. 4, p. 734–750, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 1, 25, 26 e 33.
- ABOUELJINANE, L. et al. A simulation study to improve the performance of an emergency medical service: application to the french val-de-marne department. **Simulation modelling practice and theory**, Elsevier, v. 47, p. 46–59, 2014. Citado na página 34.
- AFSHARI, H.; PENG, Q. Challenges and solutions for location of healthcare facilities. **Ind Eng Manag**, v. 3, n. 1, p. 12, 2014. Citado na página 2.
- AHMADI-JAVID, A.; SEYEDI, P.; SYAM, S. S. A survey of healthcare facility location. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 79, p. 223–263, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 11, 14 e 21.
- AL-SHAQSI, S. Z. K. Response time as a sole performance indicator in ems: Pitfalls and solutions. **Open access emergency medicine: OAEM**, Dove Press, v. 2, p. 1, 2010. Citado na página 7.
- ALSALLOUM, O. I.; RAND, G. K. Extensions to emergency vehicle location models. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 33, n. 9, p. 2725–2743, 2006. Citado na página 2.
- ANDERSSON, T.; VÄRBRAND, P. Decision support tools for ambulance dispatch and relocation. **Journal of the Operational Research Society**, Taylor & Francis, v. 58, n. 2, p. 195–201, 2007. Citado na página 1.
- ANDRADE, L. A. C.; CUNHA, C. B. An abc heuristic for optimizing moveable ambulance station location and vehicle repositioning for the city of são paulo. **International Transactions in Operational Research**, Wiley Online Library, v. 22, n. 3, p. 473–501, 2015. Citado na página 30.
- 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 na página 15.
- ARINGHIERI, R.; CARELLO, G.; MORALE, D. Supporting decision making to improve the performance of an italian emergency medical service. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 236, n. 1, p. 131–148, 2016. Citado na página 1.
- BALL, M. O.; LIN, F. L. A reliability model applied to emergency service vehicle location. **Operations research**, INFORMS, v. 41, n. 1, p. 18–36, 1993. Citado na página 16.
- BANKS, J. et al. **Discrete-event system simulation: Pearson new international edition**. [S.l.]: Pearson Higher Ed, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 25.
- 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 na página 29.

- BAŞAR, A.; ÇATAY, B.; ÜNLÜYURT, T. A multi-period double coverage approach for locating the emergency medical service stations in Istanbul. **Journal of the Operational Research Society**, Taylor & Francis, v. 62, n. 4, p. 627–637, 2011. Citado na página 31.
- BAŞAR, A.; ÇATAY, B.; ÜNLÜYURT, T. A taxonomy for emergency service station location problem. **Optimization letters**, Springer, v. 6, n. 6, p. 1147–1160, 2012. Citado na página 21.
- BATTA, R.; DOLAN, J. M.; KRISHNAMURTHY, N. N. The maximal expected covering location problem: Revisited. **Transportation Science**, INFORMS, v. 23, n. 4, p. 277–287, 1989. Citado na página 21.
- BECKER, T. K. et al. Ethical challenges in emergency medical services: controversies and recommendations. **Prehospital and disaster medicine**, Cambridge University Press, v. 28, n. 5, p. 488–497, 2013. Citado na página 7.
- BÉLANGER, V. et al. An empirical comparison of relocation strategies in real-time ambulance fleet management. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 94, p. 216–229, 2016. Citado na página 20.
- BÉLANGER, V.; RUIZ, A.; SORIANO, P. Recent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- BÉLANGER, V.; RUIZ, A.; SORIANO, P. Recent optimization models and trends in location, relocation, and dispatching of emergency medical vehicles. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 272, n. 1, p. 1–23, 2019. Citado na página 21.
- BENABDOUALLAH, M.; BOJJI, C. A review on coverage models applied to emergency location. **International Journal of Emergency Management**, Inderscience Publishers (IEL), v. 14, n. 2, p. 180–199, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 21.
- BEOJONE, C. V.; SOUZA, R. M. de. Aplicação do modelo hipercubo com prioridade na fila com mais de um servidor preferencial sem considerar a hipótese de backup parcial: estudo de caso em um samu. **SciELO Brasil**, 2017. Citado na página 28.
- BERLIN, G. N.; LIEBMAN, J. C. Mathematical analysis of emergency ambulance location. **Socio-Economic Planning Sciences**, Elsevier, v. 8, n. 6, p. 323–328, 1974. Citado na página 13.
- BLACKWELL, T. H. et al. Lack of association between prehospital response times and patient outcomes. **Prehospital Emergency Care**, Taylor & Francis, v. 13, n. 4, p. 444–450, 2009. Citado na página 7.
- BRAILSFORD, S. et al. An analysis of the academic literature on simulation and modeling in health care. In: **Operational Research for Emergency Planning in Healthcare: Volume 2**. [S.l.]: Springer, 2016. p. 231–251. Citado na página 25.
- BRAILSFORD, S.; VISSERS, J. Or in healthcare: A european perspective. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 212, n. 2, p. 223–234, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 10.

- BRAILSFORD, S. C. et al. An analysis of the academic literature on simulation and modelling in health care. **Journal of simulation**, Taylor & Francis, v. 3, n. 3, p. 130–140, 2009. Citado na página 26.
- BRANDEAU, M. L.; SAINFORT, F.; PIERSKALLA, W. P. Health care delivery: current problems and future challenges. In: **Operations Research and Health Care**. [S.l.]: Springer, 2005. p. 1–14. Citado na página 10.
- 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 4 vezes nas páginas 18, 19, 21 e 97.
- CARSON, I.; JOHN, S. Introduction to modeling and simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE. **Proceedings of the 37th conference on Winter simulation**. [S.l.], 2005. p. 16–23. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 25.
- CHUANG, C.-L.; LIN, R.-H. A maximum expected covering model for an ambulance location problem. **Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers**, Taylor & Francis, v. 24, n. 6, p. 468–474, 2007. Citado na página 21.
- CHURCH, R.; REVELLE, C. The maximal covering location problem. In: SPRINGER. **Papers of the Regional Science Association**. [S.l.], 1974. v. 32, n. 1, p. 101–118. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- DANTRAKUL, S.; LIKASIRI, C.; PONGVUTHITHUM, R. Applied p-median and p-center algorithms for facility location problems. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 41, n. 8, p. 3596–3604, 2014. Citado na página 14.
- DASKIN, M. S. A maximum expected covering location model: formulation, properties and heuristic solution. **Transportation science**, INFORMS, v. 17, n. 1, p. 48–70, 1983. Citado 3 vezes nas páginas 19, 73 e 98.
- DASKIN, M. S. What you should know about location modeling. **Naval Research Logistics (NRL)**, Wiley Online Library, v. 55, n. 4, p. 283–294, 2008. Citado na página 11.
- DASKIN, M. S. **Network and discrete location: models, algorithms, and applications**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 13.
- DEB, K. **Multi-objective optimization using evolutionary algorithms**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2001. v. 16. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- DEGEL, D. et al. Time-dependent ambulance allocation considering data-driven empirically required coverage. **Health care management science**, Springer, v. 18, n. 4, p. 444–458, 2015. Citado na página 32.
- DINHOFER, H.; SAPPADLA, P. Maximizing coverage of ems services in new york city using a double standard model. 2018. Citado na página 31.
- EHRGOTT, M. **Multicriteria optimization**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2005. v. 491. Citado na página 22.
- EISELT, H. A.; SANDBLOM, C.-L. **Decision analysis, location models, and scheduling problems**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 15.

EMMERICH, M. T.; DEUTZ, A. H. A tutorial on multiobjective optimization: fundamentals and evolutionary methods. **Natural computing**, Springer, v. 17, n. 3, p. 585–609, 2018. Citado na página 23.

ENAYATI, S. et al. Real-time ambulance redeployment approach to improve service coverage with fair and restricted workload for ems providers. **Omega**, Elsevier, v. 79, p. 67–80, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 2, 20 e 36.

FARAHANI, R. Z.; HEKMATFAR, M. **Facility location: concepts, models, algorithms and case studies**. [S.l.]: Springer, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 12.

FERRARI, T. et al. Analysis of the location of rescue ambulance dispatch bases: a case study in rio de janeiro, brazil. **Geographical Analysis**, Wiley Online Library, v. 50, n. 4, p. 397–421, 2018. Citado na página 29.

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 na página 30.

FISHMAN, G. S. **Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2013. Citado na página 26.

FU, M. C. Optimization for simulation: Theory vs. practice. **INFORMS Journal on Computing**, INFORMS, v. 14, n. 3, p. 192–215, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 30.

FU, M. C. et al. **Handbook of simulation optimization**. [S.l.]: Springer, 2015. v. 216. Citado na página 27.

GALVAO, R. D.; MORABITO, R. Emergency service systems: The use of the hypercube queueing model in the solution of probabilistic location problems. **International Transactions in Operational Research**, Wiley Online Library, v. 15, n. 5, p. 525–549, 2008. Citado na página 18.

GARCÍA, S.; MARÍN, A. Covering location problems. In: **Location Science**. [S.l.]: Springer, 2015. p. 93–114. Citado na página 16.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F. Solving an ambulance location model by tabu search. **Location science**, Pergamon, v. 5, n. 2, p. 75–88, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 95.

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 4 vezes nas páginas 20, 21, 32 e 97.

GENDREAU, M.; LAPORTE, G.; SEMET, F. The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles. **Journal of the Operational Research Society**, Springer, v. 57, n. 1, p. 22–28, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 32.

GHOLAMI-ZANJANI, S.; PISHVAEE, M.; TORABI, S. A. Or models for emergency medical service (ems) management. In: **Operations Research Applications in Health Care Management**. [S.l.]: Springer, 2018. p. 395–421. Citado na página 14.

- GHUSSN, L. de S.; SOUZA, R. M. de. Análise de desempenho do samu/bauru-sp em períodos de pico de demanda. **Gepros: Gestão da Produção, Operações e Sistemas**, Universidade Estadual Paulista-UNESP Bauru, Depto de Engenharia de Produção, v. 11, n. 3, p. 75, 2016. Citado na página 28.
- GIL, A. C. Como classificar as pesquisas. **Como elaborar projetos de pesquisa**, Atlas São Paulo, v. 4, p. 44–45, 2002. Citado na página 38.
- GUIMARÃES, M. M. **Modelos mono e multiobjetivo para o problema de localização de máxima cobertura: estudo de caso SAMU-BH**. Dissertação (Mestrado) — Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2018. Citado 11 vezes nas páginas 8, 38, 41, 43, 50, 56, 57, 58, 73, 77 e 94.
- GUIMARÃES, M. M.; MARTINS, F. V. C. A multiobjective approach applying in a brazilian emergency medical service. In: IEEE. **2018 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)**. [S.l.], 2018. p. 1–8. Citado 3 vezes nas páginas 30, 38 e 77.
- GÜNAL, M. M.; PIDD, M. Discrete event simulation for performance modelling in health care: a review of the literature. **Journal of Simulation**, Taylor & Francis, v. 4, n. 1, p. 42–51, 2010. Citado na página 26.
- HAKIMI, S. L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. **Operations research**, *Inform*, v. 12, n. 3, p. 450–459, 1964. Citado 3 vezes nas páginas 14, 29 e 91.
- HALE, T. S.; MOBERG, C. R. Location science research: a review. **Annals of operations research**, Springer, v. 123, n. 1-4, p. 21–35, 2003. Citado na página 12.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introdução à pesquisa operacional**. [S.l.]: McGraw Hill Brasil, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 10 e 25.
- HOGAN, K.; REVELLE, C. Concepts and applications of backup coverage. **Management science**, *INFORMS*, v. 32, n. 11, p. 1434–1444, 1986. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 31.
- HOLLAND, J. H. **Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence**. [S.l.]: University of Michigan Press Ann Arbor, 1975. Citado na página 29.
- HULSHOF, P. J. et al. Taxonomic classification of planning decisions in health care: a structured review of the state of the art in or/ms. **Health systems**, Taylor & Francis, v. 1, n. 2, p. 129–175, 2012. Citado na página 10.
- IANNONI, A. P.; MORABITO, R. Modelo de fila hipercubo com múltiplo despacho e backup parcial para análise de sistemas de atendimento médico emergenciais em rodovias. **Pesquisa Operacional**, *SciELO Brasil*, v. 26, n. 3, p. 493–519, 2006. Citado na página 29.
- 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 na página 29.
- IANNONI, A. P.; MORABITO, R.; SAYDAM, C. A hypercube queueing model embedded into a genetic algorithm for ambulance deployment on highways. **Annals of Operations Research**, Springer, v. 157, n. 1, p. 207–224, 2008. Citado na página 7.

- IANNONI, A. P.; MORABITO, R.; SAYDAM, C. An optimization approach for ambulance location and the districting of the response segments on highways. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 195, n. 2, p. 528–542, 2009. Citado na página 29.
- IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. [s.n.], 2018. Disponível em: <www.ibge.gov.br/>. Citado na página 4.
- ITANI, B. E.; ABDELAZIZ, F. B.; MASRI, H. A bi-objective covering location problem: Case of ambulance location in the beirut area, lebanon. **Management Decision**, Emerald Publishing Limited, v. 57, n. 2, p. 432–444, 2019. Citado na página 33.
- JAGTENBERG, C. J.; BHULAI, S.; MEI, R. D. van der. An efficient heuristic for real-time ambulance redeployment. **Operations Research for Health Care**, Elsevier, v. 4, p. 27–35, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 36.
- JARDIM, R.; CONCEIÇÃO, S.; CARVALHO, C. Localização estratégica para o serviço de atendimento móvel de urgência na região metropolitana de belo horizonte. **XXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Florianópolis, SC, Brazil**, p. 3–5, 2004. Citado na página 29.
- JIA, H.; ORDÓÑEZ, F.; DESSOUKY, M. A modeling framework for facility location of medical services for large-scale emergencies. **IIE transactions**, Taylor & Francis, v. 39, n. 1, p. 41–55, 2007. Citado 4 vezes nas páginas 13, 14, 15 e 21.
- JÚNIOR, G. P. Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Departamento de Engenharia . . . , 2011. Citado na página 22.
- JUNIOR, L. C. N. **Um estudo para redução do tempo de resposta do SAMU de Belo Horizonte através da realocação das bases de operação**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 77.
- KARABOGA, D. **An idea based on honey bee swarm for numerical optimization**. [S.l.], 2005. Citado na página 30.
- KELTON, W. D. **Simulation with ARENA**. [S.l.]: McGraw-hill, 2002. Citado na página 25.
- KERGOSIEN, Y. et al. A generic and flexible simulation-based analysis tool for ems management. **International Journal of Production Research**, Taylor & Francis, v. 53, n. 24, p. 7299–7316, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 14, 26, 33 e 34.
- KERGOSIEN, Y. et al. Managing a fleet of ambulances to respond to emergency and transfer patient transportation demands. In: SPRINGER. **Proceedings of the International Conference on Health Care Systems Engineering**. [S.l.], 2014. p. 303–315. Citado na página 14.
- LAM, S. S. W. et al. Dynamic ambulance reallocation for the reduction of ambulance response times using system status management. **The American journal of emergency medicine**, Elsevier, v. 33, n. 2, p. 159–166, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 2, 34 e 35.
- LAM, S. S. W. et al. Reducing ambulance response times using discrete event simulation. **Prehospital Emergency Care**, Taylor & Francis, v. 18, n. 2, p. 207–216, 2014. Citado na página 26.

- LAPORTE, G. et al. Application of the double standard model for ambulance location. In: **Innovations in distribution logistics**. [S.l.]: Springer, 2009. p. 235–249. Citado na página 97.
- 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 28.
- LAW, A. M. **Simulation modeling and analysis**. 5. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Tucson, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 24, 25, 38 e 39.
- LEKNES, H. et al. Strategic ambulance location for heterogeneous regions. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 260, n. 1, p. 122–133, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 2 e 35.
- LI, X. et al. Covering models and optimization techniques for emergency response facility location and planning: a review. **Mathematical Methods of Operations Research**, Springer, v. 74, n. 3, p. 281–310, 2011. Citado 5 vezes nas páginas 14, 18, 19, 20 e 21.
- LIEBERMAN, G. J.; HILLIER, F. **Introduction to mathematical programming**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1995. Citado na página 2.
- LOBATO, F. S.; STEFFEN, V. **Multi-Objective Optimization Problems: Concepts and Self-Adaptive Parameters with Mathematical and Engineering Applications**. [S.l.]: Springer, 2017. Citado na página 22.
- MALEKI, M.; MAJLESINASAB, N.; SEPEHRI, M. M. Two new models for redeployment of ambulances. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 78, p. 271–284, 2014. Citado na página 32.
- MARIANOV, V.; REVELLE, C. The queuing probabilistic location set covering problem and some extensions. **Socio-Economic Planning Sciences**, Elsevier, v. 28, n. 3, p. 167–178, 1994. Citado na página 16.
- 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 na página 21.
- MARQUES, R. R.; QUEIROZ, T. A. d. Estudo de um modelo de programação inteira para o problema de localização de estações e ambulâncias. **Blucher Mathematical Proceedings**, v. 1, n. 1, p. 410–419, 2015. Citado na página 29.
- MARUJO, L.; COSTA, R.; THOMPSON, G. Um modelo de simulação com otimização para o posicionamento de ambulâncias de um serviço de emergências médicas no rio de janeiro. **XXXVI Encontro Nacional de Engenharia de Produção, João Pessoa, PB, Brazil**, 2016. Citado na página 30.
- MCLAY, L. A.; MAYORGA, M. E. Evaluating emergency medical service performance measures. **Health Care Management Science**, Springer, v. 13, n. 2, p. 124–136, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 17.
- MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Cobertura e Centrais de Regulação das Urgências**. 2018. Disponível em: <sage.saude.gov.br>. Citado na página 3.

Ministério da Saúde. **Portaria 2.048**. Regulamenta o atendimento das Urgências e Emergências. [S.l.]: Brasil, 2002. Citado na página 3.

Ministério da Saúde. **Portaria 2.048**. Estabelece as atribuições das centrais de regulação médica de urgências e o dimensionamento técnico para a estruturação e operacionalização das Centrais SAMU-192. [S.l.]: Brasil, 2004. Citado na página 58.

Ministério da Saúde. **Orientações técnicas para o planejamento arquitetônico de uma central de regulação das urgências - SAMU 192**. [S.l.], 2014. Citado 3 vezes nas páginas 3, 46 e 57.

MOEINI, M.; JEMAI, Z.; SAHIN, E. Location and relocation problems in the context of the emergency medical service systems: a case study. **Central European Journal of Operations Research**, Springer, v. 23, n. 3, p. 641–658, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 32.

MURILLO, P. Z.; PEÑA, M. G. B. de la. Vehicle location models for emergency medical services. an application for a colombian company. **Revista EIA**, v. 15, n. 29, p. 31–46, 2018. Citado na página 31.

MURRAY, A. T. Advances in location modeling: Gis linkages and contributions. **Journal of geographical systems**, Springer, v. 12, n. 3, p. 335–354, 2010. Citado na página 13.

NAIR, R.; MILLER-HOOKS, E. Evaluation of relocation strategies for emergency medical service vehicles. **Transportation research record**, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, v. 2137, n. 1, p. 63–73, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.

NAOUM-SAWAYA, J.; ELHEDHLI, S. A stochastic optimization model for real-time ambulance redeployment. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 40, n. 8, p. 1972–1978, 2013. Citado na página 32.

NEUMAN, W. L. **Social research methods: Qualitative and quantitative approaches**. [S.l.]: Pearson education, 2013. Citado na página 38.

NOGUEIRA, L.; PINTO, L.; SILVA, P. Reducing emergency medical service response time via the reallocation of ambulance bases. **Health care management science**, Springer, v. 19, n. 1, p. 31–42, 2016. Citado 4 vezes nas páginas 8, 30, 38 e 77.

O'DWYER, G. A gestão da atenção às urgências e o protagonismo federal. **Ciência & saúde coletiva**, SciELO Public Health, v. 15, p. 2395–2404, 2010. Citado na página 3.

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 30.

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 3 vezes nas páginas 12, 15 e 16.

O'DWYER, G. et al. O processo de implantação do serviço de atendimento móvel de urgência no brasil: estratégias de ação e dimensões estruturais. **Cadernos de Saúde Pública**, SciELO Public Health, v. 33, p. e00043716, 2017. Citado na página 3.

- PINTO, L.; SILVA, P.; YOUNG, T. A generic method to develop simulation models for ambulance systems. **Simulation Modelling Practice and Theory**, Elsevier, v. 51, p. 170–183, 2015. Citado 6 vezes nas páginas 6, 8, 27, 30, 38 e 77.
- PONS, P. T. et al. Paramedic response time: does it affect patient survival? **Academic Emergency Medicine**, Wiley Online Library, v. 12, n. 7, p. 594–600, 2005. Citado na página 7.
- PONS, P. T.; MARKOVCHICK, V. J. Eight minutes or less: does the ambulance response time guideline impact trauma patient outcome? 1. **The Journal of Emergency Medicine**, Elsevier, v. 23, n. 1, p. 43–48, 2002. Citado na página 7.
- Prefeitura de Belo Horizonte. **Prodabel detalha tamanho e número de bairros das regionais**. 2018. Disponível em: <bhmap.pbh.gov.br>. Citado na página 56.
- PRIYAN, S. Operations research in healthcare: A review. **Juniper Online Journal of Public Health**, v. 1, n. 3, p. 1–7, 2017. Citado na página 10.
- RAHMAN, S.; SMITH, D. Deployment of rural health facilities in a developing country. **Journal of the Operational Research Society**, Taylor & Francis, v. 50, n. 9, p. 892–902, 1999. Citado na página 11.
- RAIS, A.; VIANA, A. Operations research in healthcare: a survey. **International transactions in operational research**, Wiley Online Library, v. 18, n. 1, p. 1–31, 2011. Citado na página 11.
- RAJAGOPALAN, H. K.; SAYDAM, C.; XIAO, J. A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 35, n. 3, p. 814–826, 2008. Citado na página 16.
- REPEDE, J. F.; BERNARDO, J. J. Developing and validating a decision support system for locating emergency medical vehicles in louisville, kentucky. **European journal of operational research**, Elsevier, v. 75, n. 3, p. 567–581, 1994. Citado 4 vezes nas páginas 20, 40, 43 e 99.
- REVELLE, C. et al. Facility location: a review of context-free and ems models. **Health Services Research**, Health Research & Educational Trust, v. 12, n. 2, p. 129, 1977. Citado 3 vezes nas páginas 15, 16 e 17.
- REVELLE, C.; HOGAN, K. The maximum availability location problem. **Transportation science**, INFORMS, v. 23, n. 3, p. 192–200, 1989. Citado 3 vezes nas páginas 19, 29 e 98.
- 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 na página 21.
- 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 11.
- REVELLE, C. S.; EISELT, H. A.; DASKIN, M. S. A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 184, n. 3, p. 817–848, 2008. Citado na página 14.

SAYDAM, C. et al. The dynamic redeployment coverage location model. **Health Systems**, Taylor & Francis, v. 2, n. 2, p. 103–119, 2013. Citado na página 19.

SAYED, M. J. E. Measuring quality in emergency medical services: a review of clinical performance indicators. **Emergency medicine international**, Hindawi, v. 2012, 2012. Citado na página 7.

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 9 vezes nas páginas 18, 29, 30, 38, 41, 43, 73, 92 e 93.

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 31 e 96.

SCHRIBER, T. J.; BRUNNER, D. T.; SMITH, J. S. Inside discrete-event simulation software: how it works and why it matters. In: IEEE PRESS. **Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference**. [S.l.], 2014. p. 132–146. Citado na página 26.

SHARIAT-MOHAYMANY, A. et al. Linear upper-bound unavailability set covering models for locating ambulances: Application to tehran rural roads. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 221, n. 1, p. 263–272, 2012. Citado na página 29.

SILVA, P. M. S. **Análise do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) de Belo Horizonte via simulação e otimização**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 77.

SILVA, P. M. S.; PINTO, L. R. Emergency medical systems analysis by simulation and optimization. In: IEEE. **Simulation Conference (WSC), Proceedings of the 2010 Winter**. [S.l.], 2010. p. 2422–2432. Citado na página 30.

SORENSEN, P.; CHURCH, R. Integrating expected coverage and local reliability for emergency medical services location problems. **Socio-Economic Planning Sciences**, Elsevier, v. 44, n. 1, p. 8–18, 2010. Citado 6 vezes nas páginas 21, 36, 40, 43, 73 e 98.

SOUZA, R. M. d. et al. Análise da configuração de samu utilizando múltiplas alternativas de localização de ambulâncias. **Gestão & Produção**, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), p. 287–302, 2013. Citado na página 29.

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, p. 1–12, 2013. Citado na página 29.

SOUZA, R. M. de et al. Incorporating priorities for waiting customers in the hypercube queuing model with application to an emergency medical service system in brazil. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 242, n. 1, p. 274–285, 2015. Citado na página 29.

STEIN, C.; WALLIS, L.; ADETUNJI, O. The effect of the emergency medical services vehicle location and response strategy on response times. **South African Journal of industrial engineering**, The Southern African Institute for Industrial Engineering, v. 26, n. 2, p. 26–40, 2015. Citado na página 33.

STORBECK, J. E. Slack, natural slack, and location covering. **Socio-Economic Planning Sciences**, Elsevier, v. 16, n. 3, p. 99–105, 1982. Citado na página 21.

SU, Q.; LUO, Q.; HUANG, S. H. Cost-effective analyses for emergency medical services deployment: A case study in shanghai. **International Journal of Production Economics**, Elsevier, v. 163, p. 112–123, 2015. Citado na página 31.

TAKAHASHI, R. H. Otimização escalar e vetorial. 2011. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.

TAKEDA, R. A.; WIDMER, J. A.; MORABITO, R. Uma proposta alternativa para avaliação do desempenho de sistemas de transporte emergencial de saúde brasileiros. **Transportes**, v. 9, n. 2, 2001. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 28.

TAKEDA, R. A.; WIDMER, J. A.; MORABITO, R. Analysis of ambulance decentralization in an urban emergency medical service using the hypercube queueing model. **Computers & Operations Research**, Elsevier, v. 34, n. 3, p. 727–741, 2007. Citado na página 28.

TEOW, K. L. Practical operations research applications for healthcare managers. **Annals Academy of Medicine Singapore**, v. 38, n. 6, p. 564–566, 2009. Citado na página 10.

TOREGAS, C. et al. The location of emergency service facilities. **Operations research, Inform**s, v. 19, n. 6, p. 1363–1373, 1971. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.

ÜNLÜYURT, T.; TUNÇER, Y. Estimating the performance of emergency medical service location models via discrete event simulation. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 102, p. 467–475, 2016. Citado na página 13.

WILDE, E. T. Do emergency medical system response times matter for health outcomes? **Health economics**, Wiley Online Library, v. 22, n. 7, p. 790–806, 2013. Citado na página 7.

YV, Y. H.; LASDON, L. S.; WISMER, D. D. On a bicriterion formation of the problems of integrated system identification and system optimization. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics**, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., n. 3, p. 296–297, 1971. Citado na página 23.

ZAREPISHEH, M.; KHORRAM, E.; PARDALOS, P. M. Generating properly efficient points in multi-objective programs by the nonlinear weighted sum scalarization method. **Optimization**, Taylor & Francis, v. 63, n. 3, p. 473–486, 2014. Citado na página 23.

ZHEN, L. et al. A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems. **Computers & Industrial Engineering**, Elsevier, v. 72, p. 12–23, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 35.

ZHI, J.; KESKIN, B. B.; MELOUK, S. H. A multi-period dynamic location planning model for emergency response. **IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering**, Taylor & Francis, v. 5, n. 4, p. 211–224, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 32.

Apêndices

APÊNDICE A – Modelos de localização aplicados em EMSs

Para mostrar a formulação de alguns modelos de localização aplicados em EMSs (em Programação Matemática) que foram citados ao longo deste trabalho (principalmente no Capítulo 2), define-se um conjunto de parâmetros e índices. Serão apresentados os modelos seminais p -mediana e p -central bem como algumas derivações relevantes do modelo MCLP.

Parâmetros:

- I : conjunto de nós de demanda;
- J : conjunto de nós candidatos a instalação de bases;
- T : conjunto de períodos;
- T' : subconjunto de períodos excluindo o último t ;
- L : conjunto de ambulâncias;
- r_{ji} : distância entre o candidato a instalação de base j e o ponto de demanda i ;
- P : número de facilidades disponíveis para instalação;
- S : distância máxima entre um nó de demanda e a facilidade mais próxima;
- N_i : conjunto de candidatos j a instalação dentro do valor S de cobertura, ou seja $N_i = \{j | d_{ij} \leq S\}$;
- N_j : conjunto de demandas i que são cobertas dentro do valor S de cobertura, ou seja $N_j = \{i | d_{ij} \leq S\}$;
- d_i : demanda pelo serviço no nó i ;
- α : fração da população que deve ser coberta por pelo menos uma ambulância localizada em um padrão de distância S_1 ;
- q : fração de ocupação das ambulâncias;
- M_{jl}^t : custo de realocação da ambulância l para a base j no instante t ;
- β : penalidade pela realocação de veículos;
- ω : percentual da população que uma ambulância é capaz de cobrir.

Índices:

- i : índice de pontos de demanda;
- j : índice de candidatos a instalações;
- p : índice de equipamentos básicos;
- s : índice de equipamentos avançados;
- z : índice de facilidades (instalações);
- k : índice de cobertura (número de ambulâncias);

- t : índice de tempo;
- l : índice de identificação das ambulâncias.

O modelo p-mediana, introduzido por Hakimi (1964), considera o conjunto de nós de demanda I e o conjunto de candidatos a instalação de facilidades J . A demanda (população) que deve ser coberta em cada ponto de demanda é definida por d_i , enquanto d_{ij} representa a distância entre um par de nós i e j . O parâmetro P indica o número de facilidades que podem ser instaladas. Duas variáveis binárias compõem a formulação, x_j assume valor 1 se for instalada uma facilidade no ponto j e 0, caso contrário; e y_{ij} assume valor 1 se as demandas do ponto i forem atendidas pela facilidade instalada no ponto j e 0, caso contrário.

$$\text{Minimizar } \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} d_i d_{ij} y_{ij} \quad (46)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in J} x_j = P, \quad (47)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I, \quad (48)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \quad (49)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (50)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J. \quad (51)$$

A função objetivo (46) minimiza a distância entre clientes e instalações. A restrição (47) assegura que exatamente P facilidades sejam instaladas. A restrição (48) garante que cada ponto de demanda seja atendido por uma facilidade. A restrição (49) admite que demandas sejam atribuídas somente às facilidades instaladas. As restrições de integralidade (50) e (51) completam o modelo.

O outro modelo seminal a ser expressado é o p-central. Sua formulação é semelhante a do modelo p-mediana. As definições são as mesmas, e também emprega-se as variáveis binárias x_j e y_{ij} . Em acréscimo adiciona-se a variável D , que representa a distância máxima entre um nó de demanda e a facilidade mais próxima para atendê-lo.

$$\text{Minimizar } D \quad (52)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in J} x_j = P, \quad (53)$$

$$\sum_{j \in J} y_{ij} = 1, \quad \forall i \in I, \quad (54)$$

$$y_{ij} - x_j \leq 0, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \quad (55)$$

$$D \geq \sum_{j \in J} d_{ij} y_{ij}, \quad \forall i \in I, \quad (56)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (57)$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall j \in J. \quad (58)$$

A função objetivo (52) minimiza a distância máxima (D) entre todos os nós de demanda e as facilidades mais próximas para atendê-los. As restrições (53)-(55) são idênticas as restrições (47)-(49) apresentadas na formulação do modelo p -mediana. A restrição (56) define a distância máxima entre qualquer nó de demanda i e a facilidade j mais próxima. Por fim, as restrições (57) e (58) representam a integralidade do modelo.

É consenso na literatura que a maioria dos modelos de otimização que abordam o problema de localização de facilidades em EMSs são derivados do modelo MCLP. São modelos que foram surgindo para superar as limitações práticas do MCLP e para adequar às aplicações em diferentes contextos. Além do mais, partindo de tais modelos, muitos outros têm sido desenvolvidos de forma que inúmeras contribuições podem ser extraídas dessas referências.

O TEAM, apresentado por Schilling et al. (1979), é uma das primeiras formulações derivadas do MCLP. O TEAM permite que mais de um equipamento (ambulância) seja considerado. O modelo utiliza três variáveis binárias, x_j^p assume valor 1 se o equipamento básico for instalado no ponto j e 0, caso contrário; x_j^s assume valor 1 se o equipamento avançado for instalado no ponto j e 0, caso contrário; y_i assume valor 1 se o nó de demanda i for coberto pelos dois tipos de equipamento simultaneamente e 0, caso contrário.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} d_i y_i \quad (59)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i^p} x_j^p \geq y_i, \quad \forall i \in I, \quad (60)$$

$$\sum_{j \in N_i^s} x_j^s \geq y_i, \quad \forall i \in I, \quad (61)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^p = P^p, \quad (62)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^s = P^s, \quad (63)$$

$$x_j^s \leq x_j^p, \quad (64)$$

$$x_j^s, x_j^p \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (65)$$

$$y_i \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I. \quad (66)$$

A função objetivo (59) maximiza a demanda coberta pelo serviço. As restrições (60) e (61) garantem que um ponto de demanda só pode ser considerado coberto pelos equipamentos básicos e avançados se os mesmos forem instalados em locais capacitados a cobri-los. As restrições (62) e (63) são referentes a limitação do sistema quanto ao número de equipamentos disponíveis de cada tipo. Enquanto que, a restrição (64) assegura que um nó de demanda deve receber cobertura simultânea dos dois tipos de equipamentos. Por fim, as restrições (65) e (66) garantem a integralidade das variáveis.

O modelo FLEET, também de Schilling et al. (1979), é similar ao TEAM e utiliza da mesma forma as variáveis binárias x_j^p , x_j^s e y_i . Nesta formulação os equipamentos podem ser alocados de forma independente. Em acréscimo, insere-se a variável z_j , que assume valor 1 se a facilidade (base) for instalada no ponto j e 0, caso contrário. A função objetivo (59), as restrições (60), (61), (62), (63) e o domínio das variáveis x_j^p , x_j^s e y_i apresentados no TEAM também são empregas nesta formulação. A inserção das seguintes restrições conferem a evolução para o modelo FLEET.

$$\sum_{j \in J_N} z_j = P^z, \quad (67)$$

$$x_j^p \leq z_j, \quad (68)$$

$$x_j^s \leq z_j, \quad (69)$$

$$z_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J. \quad (70)$$

A restrição (67) limita a quantidade máxima de bases que podem ser instaladas. As restrições (68) e (69) proíbem a designação de facilidades a locais que não possuem bases instaladas. Já a restrição (70) garante a integralidade da variável z_j .

O modelo FLEET-IC é uma versão do FLEET que trata a cobertura da demanda por diferentes tipos de ambulância de forma independente. A principal evolução em relação ao FLEET está no desmembramento da cobertura, dessa forma, um nó de demanda pode ser coberto por um tipo de ambulância e não ser coberto por outro (GUIMARÃES, 2018). Quatro variáveis binárias são aplicadas, k_{iu} assume valor 1 se o nó de demanda i for coberto pela ambulância tipo u e 0, caso contrário; x_j^u assume valor 1 se a ambulância tipo u for instalada no ponto j e 0, caso contrário; z_j assume valor 1 se a base j estiver ativa e 0, caso contrário; y_{ji}^u assume valor 1 se o ponto j cobre o nó i com a ambulância tipo u tal que $r_{ji} \leq S^u$.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{u \in U} d_{iu} k_{iu} \quad (71)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in J} x_j^u \leq P^u, \quad \forall u \in U, \quad (72)$$

$$\sum_{u \in U} x_j^u \leq C_j, \quad \forall j \in J, \quad (73)$$

$$\sum_{j \in J} z_j \leq Q, \quad (74)$$

$$\sum_{u \in U} x_j^u \leq U z_j, \quad \forall j \in J, \quad (75)$$

$$y_{ji}^u r_{ji} \leq S_u x_j^u, \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall u \in U, \quad (76)$$

$$k_{iu} \leq \sum_{j \in J} y_{ji}^u, \quad \forall i \in I, \forall u \in U, \quad (77)$$

$$z_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (78)$$

$$x_j^u \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall u \in U, \quad (79)$$

$$y_{ji}^u \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall i \in I, \forall u \in U, \quad (80)$$

$$k_{iu} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall u \in U. \quad (81)$$

A função objetivo (71) maximiza a quantidade de chamados cobertos. A restrição (72) limita o número de ambulâncias a ser alocado de acordo com a quantidade disponível. Através da restrição (73) define-se a quantidade máxima de ambulâncias que pode ser alocada a cada base. Na restrição (74) é estabelecido a quantidade máxima de bases que podem ser instaladas. Para garantir que uma ambulância não seja alocada em pontos que não existem bases ativas, emprega-se a inequação (75). Conforme a restrição (76), uma base só pode se candidatar a cobrir uma demanda por determinado tipo de ambulância se houver uma ambulância desse mesmo tipo instalada nesta base e a distância entre base e demanda obedecer o limite de tempo de resposta estipulado. Na restrição (77) determina-se que uma demanda só pode ser considerada coberta se houver pelo menos uma ambulância garantindo sua cobertura. Por fim, definem-se os domínios das variáveis nas restrições (78)-(81).

Métodos de abordagem ao problema de localização em EMSs como o p-mediana, p-central, MCLP, TEAM e FLEET são determinísticos e assumem que as ambulâncias estão sempre disponíveis quando solicitadas. No entanto, dependendo da frequência das ocorrências, do tempo de ocupação dos recursos e da aleatoriedade nos tempos de serviço e de viagem, pode ser impraticável responder a todos os chamados dentro de tempos de resposta adequados, mesmo nos locais cobertos. Então, do ponto de vista prático, alguns dos locais cobertos (de acordo com os modelos determinísticos) na verdade não estão sempre cobertos. Modelos de cobertura múltipla e modelos probabilísticos são abordagens capazes de minimizar essa limitação.

Dentre as aplicações de modelos de cobertura múltipla, destaca-se o DSM apresentado por Gendreau, Laporte e Semet (1997). Esse modelo estabelece que é preciso fornecer cobertura a toda população dentro de um padrão distância S_2 , enquanto uma fração da população deve ser coberta dentro de um padrão de distância menor, S_1 ($S_2 \geq S_1$). Neste modelo têm-se x_j a variável inteira que determina o número de ambulâncias instaladas nos pontos j ; e a variável binária y_i^k que assume valor 1 se dado ponto de demanda i receber cobertura dupla ($k = 2$) ou cobertura simples ($k = 1$) e 0, caso contrário.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} d_i y_i^2 \quad (82)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i^2} x_j \geq 1, \quad \forall i \in I, \quad (83)$$

$$\sum_{i \in I} d_i y_i^1 \geq \alpha \sum_{i \in I} d_i, \quad (84)$$

$$\sum_{j \in N_i^1} x_j \geq y_i^1 + y_i^2, \quad \forall i \in I, \quad (85)$$

$$y_i^2 \leq y_i^1, \quad \forall i \in I, \quad (86)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P, \quad (87)$$

$$x_j \leq P_j, \quad \forall j \in J, \quad (88)$$

$$y_i^1, y_i^2 \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad (89)$$

$$x_j \in \mathbb{Z}, \quad \forall j \in J. \quad (90)$$

A função objetivo (82) maximiza a cobertura dupla dentro do limite de distância S_1 . As restrições (83) e (84) são responsáveis por garantir a cobertura dupla. A restrição (83) assegura que haverá pelo menos uma instalação j capaz de cobrir todas as demandas i dentro da distância S_2 . Na restrição (85), o lado esquerdo contabiliza o número de ambulâncias cobrindo um ponto de demanda i , enquanto o lado direito será igual a 1 se o ponto i for coberto uma vez em S_1 e igual a 2 se for coberto pelo menos duas vezes dentro de S_1 . As restrições (84) e (85) combinadas garantem que a proporção α da demanda total

deve ser coberta por um padrão de cobertura S_1 . Se uma demanda tem cobertura dupla, automaticamente ela deve estar coberta antes pelo menos uma vez, condição garantida na restrição (86). As restrições (87) e (88) referem-se às limitações do sistema quanto ao número total de ambulâncias e capacidade das bases instaladas em cada j . Nas restrições (89) e (90) são definidos os domínios das variáveis.

O mDSM é uma versão multiperíodo do DSM, proposta para tratar simultaneamente da maximização da cobertura e das realocações necessárias em todo o horizonte de planejamento (SCHMID; DOERNER, 2010). Neste modelo têm-se r_{ij}^t que indica o número de veículos que devem ser realocados entre t e $t + 1$. Para lidar com as realocações de início e fim de período usa-se r_{ij}^T . A demanda efetiva que uma ambulância instalada em j é capaz de cobrir em um ponto i em um período t é computado por z_{ij}^t . A formulação ainda utiliza a variável inteira x_j^t para determinar o número de ambulâncias instaladas nos pontos j em cada período t ; e a variável binária $y_i^{k,t}$ que assume valor 1 se dado ponto de demanda i for coberto k vezes ($k = 1, 2$) no período t e 0, caso contrário.

$$\text{Maximizar } \sum_{t \in T} \left(\sum_{i \in I} d_i y_i^{2,t} - \beta \sum_{i,j \in J} r_{ij}^t \right) \quad (91)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i^{2,t}} x_j^t \geq 1, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (92)$$

$$\sum_{i \in I} d_i y_i^{1,t} \geq \alpha \sum_{i \in I} d_i, \quad \forall t \in T, \quad (93)$$

$$\sum_{j \in N_i^{1,t}} x_j^t \geq y_i^{1,t} + y_i^{2,t}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (94)$$

$$y_i^{2,t} \geq y_i^{1,t}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (95)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^t = P, \quad \forall t \in T, \quad (96)$$

$$x_j^t \leq P_j, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (97)$$

$$x_j^t + \sum_{i \in I} r_{ij}^t - \sum_{i \in I} r_{ji}^t = x_j^{t+1} \quad \forall j \in J, \forall t \in T', \quad (98)$$

$$x_j^T + \sum_{i \in I} r_{ij}^T - \sum_{i \in I} r_{ji}^T = x_j^1 \quad \forall j \in J, \quad (99)$$

$$\sum_{i \in N_j^{2,t}} z_{ij}^t \leq \omega P_j, \quad \forall j \in J, \forall t \in T, \quad (100)$$

$$\sum_{j \in N_i^{2,t}} z_{ij}^t = d_i, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, \quad (101)$$

$$y_i^{k,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall t \in T, k \in \{1, 2\}, \quad (102)$$

$$x_j^t \in \mathbb{Z}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T. \quad (103)$$

A função objetivo (91) maximiza a cobertura dupla dentro do limite de distância S_1

no período t e ao mesmo tempo impede que excessivas realocações sejam executadas. As restrições (92)-(96) seguem a mesma interpretação das restrições (83)-(88) e em adição passam a tratar do problema em multiperíodos t . Para que as ambulâncias possam trocar de base entre períodos corretamente emprega-se as restrições (97) e (98). Devido às restrições (99) e (100), todas as demandas são atribuídas às bases, garantindo ao mesmo tempo que nenhuma ambulância pode cobrir mais que ω demandas. Nas restrições (102) e (103) são definidos os domínios das variáveis.

Exemplo de abordagem dinâmica com estratégia de realocação em tempo real, o modelo RP^t foi formulado por Gendreau, Laporte e Semet (2001). Seu aspecto dinâmico é representado pela constante M_{jl}^t , que contabiliza o custo de realocação da ambulância l para a base j no instante t , registrando assim parte do histórico das ambulâncias. Por exemplo, se o veículo l já tiver sido realocado antes de um certo tempo t à base j , então a constante M_{jl}^t aplicará uma penalização maior na função objetivo, além disso, se realocar uma ambulância l para um ponto j implicar na violação de uma das condições do modelo a realocação não é permitida (LAPORTE et al., 2009). No RP^t a variável binária y_i^k tem o mesmo significado apresentado no DSM, enquanto a variável binária x_{jl} assume 1 sempre que a ambulância l for realocada para a base j e 0, caso contrário. Tirando-se a variável x_{jl} , as demais variáveis, os parâmetros e as restrições do modelo podem ser interpretadas como no DSM (BROTCORNE; LAPORTE; SEMET, 2003).

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} d_i y_i^2 - \sum_{j \in J} \sum_{l \in L} M_{jl}^t x_{jl} \quad (104)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i^2} \sum_{l \in L} x_{jl} \geq 1, \quad \forall i \in I, \quad (105)$$

$$\sum_{i \in I} d_i y_i^1 \geq \alpha \sum_{i \in I} d_i, \quad (106)$$

$$\sum_{j \in N_i^1} \sum_{l \in L} x_{jl} \geq y_i^1 + y_i^2, \quad \forall i \in I, \quad (107)$$

$$y_i^2 \leq y_i^1, \quad \forall i \in I, \quad (108)$$

$$\sum_{j \in J} x_{jl} = 1, \quad \forall l \in L, \quad (109)$$

$$\sum_{l \in L} x_{jl} \leq P_j, \quad \forall j \in J, \quad (110)$$

$$y_i^1, y_i^2 \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \quad (111)$$

$$x_{jl} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall l \in L. \quad (112)$$

As restrições (105)-(110) do modelo RP^t seguem a mesma interpretação das restrições (83)-(88) apresentadas no DSM. A diferença é que no modelo RP^t considera-se a individualidade de cada ambulância l em algumas restrições. Em (111) e (112) têm-se a

integralidade do modelo definida. Já a função objetivo (104) maximiza a cobertura dupla dentro do limite de distância preestabelecido $S1$, menos a soma das penalidades associadas com as realocações da ambulância l no tempo t .

Como exemplo de abordagem de modelo estocástico ressaltamos o MEXCLP, também apresentado como alternativa para superar a limitação da cobertura simples, que foi formulado por Daskin (1983). Assume-se que cada ambulância tem a mesma probabilidade (q) de estar indisponível para atender um chamado e que todas as ambulâncias operam de forma independente. A fração de ocupação é calculada pela razão entre a demanda total e a capacidade total de ambulâncias em horas. Este modelo emprega a variável binária y_i^k que assume valor 1 se dado ponto de demanda i receber cobertura de k ambulâncias e 0, caso contrário. A variável inteira x_j determina o número de ambulâncias instaladas nos pontos j . Sendo que, mais de um veículo pode ser alocado a mesma base.

$$\text{Maximizar } \sum_{i \in I} \sum_{k=1}^P d_i (1-q)^{k-1} y_{ik} \quad (113)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i} x_j \geq \sum_{k=1}^P y_{ik}, \quad \forall i \in I, \quad (114)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq P, \quad (115)$$

$$x_j \in \mathbb{Z} \quad \forall j \in J, \quad (116)$$

$$y_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I. \quad (117)$$

A função objetivo (113) maximiza a demanda coberta levando em conta a fração de ocupação das ambulâncias. A restrição (114) garante que uma demanda seja considerada coberta somente se uma ou mais ambulâncias capacitadas a garantir sua cobertura forem instaladas. A restrição (115) refere-se a limitação do sistema quanto ao número ambulâncias. Por fim, para garantir os domínios das variáveis as restrições (116) e (117) são estabelecidas.

Partindo da referência do MEXCLP combinado com conceito de frações de ocupação locais introduzidos por ReVelle e Hogan (1989) no modelo MALP, que permite considerar a indisponibilidade das ambulâncias individualmente para cada ponto de demanda, Sorensen e Church (2010) apresenta em seu trabalho a formulação LR-MEXCLP. Conforme proposto no modelo LR-MEXCLP, o nível de serviço no ponto de demanda $i \in I$, dado a alocação de $k \in P$ ambulâncias dentro de sua zona de cobertura, representado por $q_{i,k}$, pode ser calculado por meio da fração de ocupação destas mesmas k ambulâncias dentro da zona de cobertura deste mesmo ponto de demanda i , sendo esta fração de ocupação representada por $b_{i,k}$. O cálculo de $b_{i,k}$ e de $q_{i,k}$ é representado por (118) e por (119):

$$b_{i,k} = \frac{\sum_{j \in N_i} d_j}{k} \quad (118)$$

$$q_{i,k} = 1 - (b_{i,k})^k \quad (119)$$

$$\text{Maximize } Z = \sum_{i \in I} \sum_{k=1}^P d_i q_{i,k} y_{i,k} \quad (120)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i} x_j - \sum_{k=1}^P k y_{i,k} \geq 0, \quad \forall i \in I, \quad (121)$$

$$\sum_{k=1}^{K_{max}} y_{i,k} \leq 1 \quad \forall i \in I, \quad (122)$$

$$\sum_{j \in J} x_j \leq P, \quad (123)$$

$$x_j \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \quad (124)$$

$$y_{i,k} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, \forall k = 1, \dots, P. \quad (125)$$

A função objetivo (120) maximiza a demanda coberta multiplicada pelo nível de serviço oferecido aos pontos de demanda. O primeiro conjunto de restrições (121) determina o número de ambulâncias que cobrirá cada ponto de demanda. Neste caso, se o somatório de x_j é menor do que k então não é possível atribuir valor 1 para a variável binária $y_{i,k}$. Dado que o valor do multiplicador da função objetivo $q_{i,k}$ aumenta com o incremento de k , $y_{i,k}$ sempre buscará atribuir 1 para o maior valor de k possível para cada ponto de demanda i . O conjunto de inequações (122) garante que pelo menos um valor de $y_{i,k}$ para um dado ponto de demanda i deve ser atribuído em 1. O conjunto de restrições (123) restringe o uso de ambulâncias de acordo com a capacidade do sistema. Finalmente, as restrições (124) e (125) garantem a integralidade das variáveis.

O modelo TIMEXCLP, apresentado por Repede e Bernardo (1994), deriva diretamente do modelo MEXCLP. Além da abordagem probabilística do MEXCLP, tal formulação insere considerações relativas às variações temporais na demanda, no número de ambulâncias disponíveis e na velocidade dos veículos. Tais considerações classificam o TIMEXCLP como modelo dinâmico, com abordagem multiperíodo. Utiliza-se a variável binária y_{ik}^t que assume valor 1 se dado ponto de demanda i receber cobertura de k ambulâncias no período t e 0, caso contrário. A variável inteira x_j^t determina o número de ambulâncias instaladas nos pontos j em cada período t .

$$\text{Maximizar } \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k=1}^{P^t} (d_i^t) (1 - q_t) (q_t^{k-1}) (y_{ik}^t) \quad (126)$$

$$\text{sujeito a: } \sum_{j \in N_i^t} x_j^t \geq \sum_{k=1}^{P^t} y_{ik}^t, \quad \forall i \in I, \forall t \leq T, \quad (127)$$

$$\sum_{j \in J} x_j^t \leq P^t, \quad \forall t \leq T, \quad (128)$$

$$x_j^t \in \mathbb{Z} \quad \forall j \in J, \forall t \leq T, \quad (129)$$

$$y_{ik}^t \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, k = 1, \dots, p, \forall t \leq T. \quad (130)$$

A função objetivo (126) maximiza a demanda coberta levando em conta a fração de ocupação das ambulâncias e as variações temporais em multiperíodos. A restrição (127) garante que uma demanda em um ponto i em certo período seja considerado coberto somente se uma ou mais ambulâncias capacitadas a garantir sua cobertura forem instaladas naquele período t . A restrição (128) refere-se a limitação do sistema quanto ao número de ambulâncias, que deve ser respeitada em todos os períodos. As restrições (116) e (117) definem os domínios das variáveis.