



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção



**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE EMERGÊNCIA MÉDICA  
VIA SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO – O CASO DO SAMU DAS CIDADES DE  
OURO PRETO E MARIANA – MINAS GERAIS**

**Tháise Regina Matos de Moraes**

OURO PRETO – MG  
2021

**Tháise Regina Matos de Moraes**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE EMERGÊNCIA MÉDICA  
VIA SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO: O CASO DO SAMU DAS CIDADES DE  
OURO PRETO E MARIANA – MINAS GERAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Aloísio de Castro Gomes  
Júnior

Coorientador: Profa. Dra. Lásara Fabrícia  
Rodrigues

OURO PRETO – MG  
2021

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M827a Morais, Thaise Regina Matos de .

Análise de desempenho de um sistema de emergência médica via simulação e otimização [manuscrito]: o caso do SAMU das cidades de Ouro Preto e Mariana - Minas Gerais. / Thaise Regina Matos de Morais. - 2021.

99 f.

Orientador: Prof. Dr. Aloísio de Castro Gomes Jr..

Coorientadora: Profa. Dra. Lásara Fabrícia Rodrigues.

Dissertação (Mestrado Acadêmico). Universidade Federal de Ouro Preto. Departamento de Engenharia de Produção. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

1. Otimização - Simulação. 2. Simulated Annealing. 3. Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU). 4. Tratamento térmico - Recozimento. I. Gomes Jr., Aloísio de Castro. II. Rodrigues, Lásara Fabrícia . III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
REITORIA  
ESCOLA DE MINAS  
PROGRAMA DE POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA DE  
PRODUCAO



**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**Tháise Regina Matos de Moraes**

**Análise de Desempenho de um Sistema de Emergência Médica via Simulação e Otimização – o Caso do SAMU das Cidades de Ouro Preto e Mariana – Minas Gerais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em 01 de julho de 2021

Membros da banca

- [Doutor] - Aloisio de Castro Gomes Júnior - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
- [Doutora] - Lásara Fabrícia Rodrigues - Coorientadora - (Universidade Federal de Minas Gerais)
- [Doutor] - Alexandre Xavier Martins - (Universidade Federal de Ouro Preto)
- [Doutor] - Luiz Ricardo Pinto- (Universidade Federal de Minas Gerais)

Aloisio de Castro Gomes Júnior, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 01/11/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Aloisio de Castro Gomes Junior, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 01/07/2021, às 11:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufop.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0188758** e o código CRC **EE859328**.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”

Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por me permitir viver esse momento, me conceder saúde, força e inspiração.

Toda a honra e louvor a ti, Senhor!

À minha família, por compreender minha ausência e o meu cansaço. Por acreditar e sonhar junto a mim, não permitindo que em momento algum, o desânimo me dominasse.

Foi e sempre será por vocês.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Aloísio Gomes Jr. e coorientadora Profa. Dra. Lásara Rodrigues, pelos conhecimentos, ideias e sugestões compartilhados.

À CAPES e à Universidade Federal de Ouro Preto, pelos recursos disponibilizados.

À FAPEMIG, por financiar a pesquisa e por conceder a bolsa de estudos durante parte do tempo de realização deste trabalho.

Aos colegas da iniciação científica, que realizaram a coleta de dados junto ao SAMU das cidades de Ouro Preto e Mariana.

À secretaria de saúde municipais de Ouro Preto e Mariana, por autorizar a realização deste estudo.

Aos gestores do SAMU de Ouro Preto e Marina, por permitir acesso às instalações e aos dados utilizados neste estudo.

Aos colegas do Mestrado, pelo companheirismo, troca de conhecimentos, ideias e palavras motivadoras durante todo o processo.

## RESUMO

O tempo de resposta de um Sistema Médico de Emergência (SME) é uma métrica preponderante de eficiência, visto que atender rapidamente as vítimas de urgência e emergência, prestando-lhes o atendimento pré-hospitalar, determina a minimização de sequelas permanentes ao mesmo tempo que maximiza a taxa de sobrevivência do paciente. Este trabalho objetiva avaliar o desempenho do SAMU (Serviço de Atendimento Móvel de Urgência) das cidades de Ouro Preto e Mariana, através de seus indicadores de desempenho. Para tanto, foi desenvolvido um sistema computacional, em linguagem *Python*, e a partir deste, simulou-se diferentes cenários, que levavam em consideração diferentes políticas de despacho, aumento da demanda, realocação de unidades de resgate, entre outros, com objetivo de verificar o impacto no tempo de resposta do sistema. A esta estrutura, foi integrada a metaheurística *Simulated Annealing*, objetivando alcançar um resultado “otimizado”, que se apresentasse como o melhor dentre os cenários obtidos através da simulação, com o tempo de resposta médio do sistema reduzido. Considera-se este objetivo bastante relevante, em virtude da criticidade inerente às atividades do SME, onde sua eficiência determina a sobrevivência e/ou melhores condições de saúde do paciente. Ademais, um SME bem estruturado também resulta em uma melhor aplicabilidade de seus limitados recursos. Por se tratar de um sistema complexo, que envolve inúmeras variáveis de natureza estocástica, fazê-lo via simulação se mostra atraente e justificável. Os resultados obtidos demonstraram que uma nova configuração, com estratégicas localizações de bases e respectivas alocações das ambulâncias, impactaria em uma redução de aproximadamente 10% no tempo de resposta de sistema. Demonstraram ainda, a importância de se analisar de forma conjunta ao número de habitantes, diferentes variáveis, como extensão territorial, complexidades geográficas e infraestruturas locais, ao se determinar o número necessário de ambulâncias para se atender as demandas de urgência no serviço pré-hospitalar.

**Palavras-chave:** Otimização da Simulação, *Simulated Annealing*, Serviço de emergência médica, SAMU

## ABSTRACT

The response time of an Emergency Medical System (EMS) is a preponderant metric of efficiency, since quickly assisting urgency and emergency victims, providing them with pre-hospital care, determines the minimization of permanent sequels at the same time maximizes the patient's survival rate. This work aims to evaluate the performance of SAMU (Mobile Emergency Service) in the cities of Ouro Preto and Mariana, through their performance indicators. For that, a computational system was developed, in Python language, and from this, different scenarios were simulated, which took into account different dispatch policies, increased demand, reallocation of rescue units, among others, in order to verify the impact on the system's response time. The Simulated Annealing metaheuristic was integrated into this structure in order to achieve an "optimized" result, which would present itself as the best among the scenarios obtained through simulation, with minimized response time. This objective is considered to be quite relevant due to the criticality inherent in the activities of the SME, where its efficiency determines the survival and / or better health conditions of the patient. In addition, a well-structured EMS also results in a better applicability of its limited resources. Because it is a complex system, involving numerous variables of a stochastic nature, doing it via simulation is attractive and justifiable. The results achieved demonstrated that a new configuration, with location of bases and respective strategic allocations would impact on a reduction of approximately 10% in the system response time. They also demonstrated the importance of analyzing together the number of inhabitants, different variables, such as territorial extension, geographic complexities and local infrastructures, when determining the necessary number of ambulances to meet the emergency demands in the pre-hospital service.

**Keyword:** Simulation Optimization, Simulated Annealing, Emergency Medical Service, SAMU



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1	Objetivo Geral.....	14
1.2	Objetivos Específicos .....	14
1.3	Justificativa.....	15
1.4	Organização do trabalho .....	16
<b>2.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>17</b>
2.1	Simulação de Eventos Discretos .....	17
2.1.1	Classificação dos modelos de simulação e principais terminologias.....	18
2.1.2	Fases de um estudo da Simulação .....	19
2.1.3	Modelagem de Problemas de simulação.....	21
2.1.4	Principais ferramentas computacionais de simulação .....	22
2.2	Otimização da Simulação.....	23
2.3	Métodos heurísticos de solução .....	26
2.4	Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU 192).....	30
2.5	Aplicações de Técnicas da Pesquisa Operacional em Serviços Médicos .....	31
2.5.1	Programação Linear (PL) em Sistemas Médicos.....	32
2.5.2	Modelos de Filas aplicados a problemas de SME .....	33
2.5.3	Análise de SME utilizando Simulação e simulação via Otimização .....	34
3.1	O SAMU das cidades de Ouro Preto e Mariana.....	38
3.2	O processo de atendimento do SAMU .....	42
<b>4</b>	<b>SIMULANDO O SISTEMA ESTUDADO .....</b>	<b>45</b>
4.1	Formulação do Problema.....	45
4.2	Coleta e tratamento de dados .....	46
4.2.1	Coleta de dados .....	46
4.2.2	Tratamento dos dados.....	48
4.3	Criação do Modelo Conceitual .....	51
4.4	Criação do modelo computacional de simulação.....	53

4.4.2	Determinação dos parâmetros de execução do modelo .....	58
<b>4.5</b>	<b>Resultados dos experimentos de simulação.....</b>	<b>60</b>
4.5.1	Configuração à época da coleta de dados x Configuração atual do sistema .....	60
4.5.2	Alteração da Política de Despacho .....	61
4.5.3	Realocação de ambulância .....	63
4.5.4	Retirada de uma unidade do tipo USB .....	64
4.5.5	Aumento da demanda .....	65
4.5.6	Retirada de 3 ambulâncias do sistema .....	66
<b>4.5</b>	<b>Tempo médio de resposta preconizado por leis internacionais.....</b>	<b>68</b>
<b>4.6</b>	<b>Discussões dos resultados.....</b>	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>72</b>
<b>5.1</b>	<b>Solução do problema .....</b>	<b>74</b>
5.1.1	Solução Inicial.....	74
<b>5.2</b>	<b>Estruturas de vizinhança .....</b>	<b>76</b>
<b>5.3</b>	<b>Parâmetros de controle do modelo.....</b>	<b>78</b>
<b>5.4</b>	<b>Resultados dos experimentos de Otimização da Simulação .....</b>	<b>79</b>
5.4.1	Localização e alocação estratégica de bases e ambulâncias .....	79
5.4.2	Localização estratégica em cenários de aumento da demanda .....	81
5.4.3	Localização estratégica de bases em cenário de alteração de política de despacho.....	85
5.4.4	Localização estratégica de bases em cenário de retirada de uma ambulância do sistema ...	86
5.4.5	Localização estratégica da base em cenário de retirada de três ambulâncias do sistema ....	87
<b>5.5</b>	<b>Discussões dos resultados.....</b>	<b>88</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>90</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>93</b>

**Lista de Figuras**

Figura 1: Elementos básicos de um DCA.....	22
Figura 2: Representação da ideia da Otimização da Solução.....	25
Figura 3: Pseudocódigo do SA para um problema de minimização.....	30
Figura 4: Distribuição geográfica do município de Ouro Preto e Mariana .....	38
Figura 5: Dinâmica de atendimento do SAMU .....	42
Figura 6: Distribuição geográfica das ocorrências de urgência.....	46
Figura 7: Modelo conceitual do SAMU de Ouro Preto e Mariana .....	52
Figura 8: Lógica computacional – Chamado.....	53
Figura 9: Lógica Computacional – Ambulância .....	55
Figura 10: Variação do tempo de resposta pelo tempo simulado.....	59
Figura 11: Pseudocódigo da estrutura de Otimização da Simulação proposta .....	72
Figura 12: Exemplo de solução retornada pelo método SA_Simul .....	74
Figura 13: Ilustração dos movimentos adotados .....	77

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Agrupamento dos pontos de demanda em células.....	39
Tabela 2: Política de despacho de ambulâncias no sistema centralizado .....	41
Tabela 3: Política de despacho de ambulâncias no sistema descentralizado.....	42
Tabela 4 - Número de dados analisados .....	47
Tabela 5: Critérios para a classificação do <i>p-value</i> .....	50
Tabela 6: Distribuições Teóricas de melhor ajuste aos dados .....	50
Tabela 7: Validação do Tempo de resposta do sistema.....	57
Tabela 8: Validação por análise de sensibilidade da taxa de ocupação.....	58
Tabela 9: Intervalo de confiança para as métricas de desempenho .....	60
Tabela 10: Indicadores de resposta – Diferentes configurações.....	61
Tabela 11: Indicadores de fila e ocupação – Diferentes configurações .....	61
Tabela 12 : Indicadores de resposta – Políticas de Despacho .....	62
Tabela 13: Indicadores de filas e ocupação – Políticas de despacho.....	62
Tabela 14: Indicadores de resposta – Realocação USB 7556 .....	63
Tabela 15: Indicadores de fila – Realocação USB7556 .....	63
Tabela 16: Indicadores de Resposta – Retirada USB7556.....	64
Tabela 17: Indicadores de fila – Retirada USB7556 .....	65
Tabela 18: Indicadores de Resposta – Aumento da demanda .....	66
Tabela 19: Indicadores de fila – Aumento da demanda .....	66
Tabela 20: Indicadores de resposta – Sistema com 1 ambulância.....	67
Tabela 21: Indicadores de Fila – Sistema com 1 ambulância.....	67
Tabela 22: Indicadores de resposta – Sistema com 30 ambulâncias .....	68
Tabela 23: Indicadores de Fila – Sistema com 30 ambulâncias .....	69
Tabela 24: Localização estratégica das bases com tempo de reposta minimizado .....	80
Tabela 25: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 5% .....	81
Tabela 26: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 10% .....	82
Tabela 27: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 15% .....	83
Tabela 28: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 20% .....	84
Tabela 29: Localização estratégica das bases – Alteração Política de Despacho .....	85
Tabela 30: Localização estratégica da base – Retirada de 1 ambulância .....	86
Tabela 31: Localização estratégica da base – Retirada de 3 ambulâncias.....	87

**Lista de Quadros**

Quadro 1: Relação de ambulâncias do SAMU de Ouro Preto / Mariana .....	40
Quadro 2: Parâmetros de entrada do algoritmo SA_Simul .....	73
Quadro 3: Identificação dos pontos de demanda na solução do problema.....	75
Quadro 4: Parâmetros do modelo de otimização da simulação.....	78
Quadro 5: Parâmetros do modelo de otimização da simulação.....	79

## Lista de Abreviaturas

APH	Atendimento pré-hospitalar
DCA	Diagrama de Ciclos de Atividades
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
OMS	Organização Mundial da Saúde
SAMU	Serviço de Atendimento Móvel de Urgência
SED	Simulação de Eventos Discretos
SME	Sistema Médico de Emergência
TR	Tempo de resposta
UPA	Unidade de Pronto Atendimento
USA	Unidade de Serviço Avançada
USB	Unidade de Serviço Básica

## 1. INTRODUÇÃO

O atendimento pré-hospitalar (APH) móvel caracteriza-se por prestar assistência às pessoas em situações de urgência de natureza traumática, cirúrgica, psiquiátrica, clínica, pediátrica, gineco-obstétrica, no local da ocorrência, proporcionando-lhes um atendimento precoce, bem como o acesso do usuário ao sistema de saúde (BRASIL, 2006). Neste contexto está inserido o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU), que foi instituído como o componente Pré-Hospitalar da Política Nacional de Atenção às Urgências.

No Brasil, o SAMU é um Serviço de Emergência Médica (SME), de responsabilidade governamental, onde o usuário busca acesso ao serviço através de uma chamada telefônica gratuita. Foi criado em 2002, pelo Ministério da Saúde e normatizado pela portaria nº 1864 do ano de 2003 com o intuito de minimizar o número de óbitos, sequelas e tempo de internação hospitalar (BRASIL, 2003b).

Fornecendo a primeira reposta aos cidadãos em situações angustiantes, os SME's se mostram de fundamental importância na prestação de serviços de boa qualidade, que tem se intensificado diante de uma realidade de envelhecimento da população (ARINGHIERI; CARELLO; MORALLE, 2016). Outros fatores, como crescimento acelerado dos centros urbanos, infraestruturas precárias em municípios de menor população ou zonas rurais, que interferem na qualidade de vida dos cidadãos, no que se refere à locomoção das pessoas e acesso à espaços públicos, torna o transporte qualificado e em tempo hábil, como é o caso das urgências e emergências, um grande desafio ao poder público.

Neste sentido, os gestores dos sistemas de emergência médica são provocados a estruturar e manter um serviço essencial para a promoção de melhores condições de recuperação e sobrevivência, a partir de recursos limitados. Assim, a análise do desempenho e desenvolvimento de ferramentas que auxiliam o processo de tomada de decisão, têm sido ações constantemente adotadas.

Por se tratar de um processo cuja demanda se altera constantemente, tanto em número de ocorrências (dependendo da hora do dia, dia da semana e até períodos sazonais do ano) quanto em localização da vítima, dimensionar o sistema de forma eficiente é bastante desafiante. Além disso, o alto grau de incerteza que envolve as operações do sistema, exige que uma ociosidade mínima seja respeitada para que o sistema seja capaz de responder com eficiência às demandas de urgência (SILVA; PINTO, 2010). A taxa de

utilização deve ser baixa o suficiente para garantir a disponibilidade do serviço para os chamados urgentes e equilibrada entre as equipes visando a equidade social (ABOUELIJINANI; SAHIN; JEMAI, 2013).

Desta forma, ao se avaliar o desempenho de um SME, além do tempo de resposta, que é caracterizado pelo tempo decorrido entre o recebimento da chamada até a chegada da primeira equipe de socorro ao local de ocorrência da emergência, a taxa de utilização dos servidores do sistema, que se refere à fração do tempo de serviço em relação ao tempo total de trabalho, também deve receber a devida atenção.

Localizar estrategicamente as bases e as ambulâncias do sistema reduz tanto os custos operacionais quanto o risco de incapacidade ou fatalidade oriundas das urgências (ÜNLÜYURT; TUNÇER, 2016). Diante do exposto, a pergunta que elucidou o desenvolvimento deste trabalho foi: É possível diminuir o tempo de resposta do SAMU Ouro Preto / Mariana a partir de um novo dimensionamento do sistema?

Os objetivos gerais e específicos, bem como a justificativa de realização desta pesquisa são descritos nas próximas subseções.

### **1.1 Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema computacional, linguagem *Python*, baseado em simulação a eventos discretos e métodos heurísticos, visando identificar melhores configurações para o SAMU de Ouro Preto e Mariana, com a finalidade de reduzir o tempo de resposta do sistema.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Desenvolver um algoritmo de simulação a eventos discretos em linguagem Python que represente fielmente as operações do sistema objeto de estudo;
- Integrar ao modelo de simulação um método meta-heurístico com a finalidade de identificar a localização adequada das bases;
- Avaliar o desempenho do sistema a partir do modelo de simulação, em cenários alternativos, que considerem situações de:
  - i. diferentes configurações aplicadas ao sistema;
  - ii. alteração da política de despacho;
  - iii. realocação de ambulância;
  - iv. variação no número de servidores do sistema;



- v. aumento da demanda;
- vi. adequação do número de ambulância à lei nacional;
- vii. adequação às métricas preconizadas por leis internacionais;
- Determinar a partir do modelo de otimização da simulação, configurações alternativas, que reduza o tempo de resposta do sistema, considerando situações de:
  - i. aumento da demanda;
  - ii. alteração da política de despacho;
  - iii. variação no número de servidores do sistema;
  - iv. adequação do número de ambulância à lei nacional;

### 1.3 Justificativa

Os Serviços de Emergência Médica têm por objetivo, responder eficientemente às demandas da população, fornecendo atendimento pré-hospitalar em situações de urgências, com o intuito de minimizar sequelas e taxas de mortalidade, melhorando as chances de recuperação do paciente. Neste contexto, o Tempo de Resposta (TR) é um aspecto crítico, sobremaneira em casos onde existe o risco de morte (ABOUELJINANE; SAHIN; JEMAI, 2013). Ademais, a resposta rápida do sistema a um evento de emergência é uma grande expectativa do público que demanda os serviços.

Diversos trabalhos da literatura médica relacionam o tempo de resposta à taxa de sobrevivência do paciente, sobretudo, em caso de vítimas de traumas ou parada cardiorrespiratória (PELL et al, 2001; GONZALES *et al.*, 2009; BYRNE *et al.*, 2019).

Ainda que os resultados de alguns trabalhos realizados contradigam essa relação (PONS; MARKOVCHICK, 2002; BLACKWELL; KAUFMAN, 2008), o tempo de resposta é dentre os fatores de avaliação de desempenho, o mais crítico na tomada de decisões que se referem a configuração do SME (SU; LUO; HUANG, 2015).

Neste cenário, verifica-se a justificativa de realização do estudo, já que, ao se dimensionar o sistema de forma eficiente, obter-se-á um serviço de maior qualidade, que atenda os anseios e necessidades da população, tal qual é o objetivo de projetos de iniciativa pública.

Ao integrar as metodologias de otimização e simulação é possível analisar diferentes cenários e obter-se bons resultados, ainda que sem a garantia que este seja a melhor

solução. A estrutura utilizada neste estudo foi desenvolvida em linguagem de programação *Python*, utilizando-se dos conceitos da simulação de eventos discretos juntamente aos conceitos de métodos de solução aproximada. O sistema computacional desenvolvido permitiu maior flexibilidade e eficiência nas análises de cenários alternativos, além de ser facilmente adaptável à análise de sistemas similares.

A otimização da simulação é amplamente utilizada na análise de SME's, utilizando os mais diversos métodos heurísticos de solução. O modelo proposto utilizou-se da metaheurística *Simulated Annealing*, visto que trabalhos anteriormente realizados, demonstraram a eficiência do método na solução de problemas de localização (GOLABIAN *et al.*, 2021) ou ainda, quando comparados a outras meta-heurísticas, em pacotes de otimização da simulação de *softwares* comerciais (LAW; MCCOMAS, 2002; ESKANDARI *et al.*, 2011).

Os resultados obtidos pelo estudo poderão ser utilizados como subsídios no processo de tomada de decisão, garantindo à qualidade dos serviços prestados pelo sistema à população, fornecendo uma resposta mais ágil em situações onde o tempo determina a condição de recuperação ou sobrevivência da vítima.

#### **1.4 Organização do trabalho**

A dissertação está organizada da seguinte maneira: nesta seção é apresentada uma introdução ao tema e ao problema estudado, bem como os objetivos gerais e específicos a serem alcançados pelo trabalho, além da motivação e justificativa da realização deste estudo. A seção 2 apresenta a revisão da literatura desenvolvida acerca do tema estudado, apontando conceitos e aplicações dos métodos de simulação de eventos discretos e otimização da simulação em análises de sistemas médicos emergenciais. Na seção 3, as características e particularidades do sistema estudado são apresentadas. Em seguida, na seção 4, são apresentados os resultados da análise dos dados coletados, a lógica de construção do modelo computacional de simulação e os resultados dos cenários avaliados. Na seção 5, é apresentado o modelo integrado de otimização e simulação de eventos discretos, bem como os principais resultados alcançados com as análises realizadas. Por fim, na seção 6, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Nesta seção será apresentada a revisão de literatura realizada acerca do tema estudado, abordando a simulação de eventos discretos, a otimização da simulação, os métodos heurísticos de solução, destacando a meta-heurística *Simulated Annealing*, utilizada neste estudo. Além disso, o SME objeto de estudo também será introduzido. Por fim, serão apresentados trabalhos que utilizaram técnicas da Pesquisa Operacional objetivando estudar SME's.

### 2.1 Simulação de Eventos Discretos

A modelagem de sistemas complexos tornou-se habitual nas mais diversas áreas por se apresentar como uma técnica eficiente de coleta de dados, com o objetivo de auxiliar o processo de tomada de decisão. A complexidade dos sistemas reais raramente permite que eles sejam modelados a partir de técnicas de soluções analíticas. Neste cenário, a utilização da técnica de simulação mostra-se bastante aplicável (FISHMAN, 2001).

Banks (1998) define simulação como uma representação da operação de um processo ou sistema do mundo real ao longo do tempo, onde a partir da análise de uma história artificial, é possível fazer inferências sobre características operacionais de um sistema do mundo real.

A Simulação de Eventos Discretos (SED) diz respeito à modelagem de sistemas cujas variáveis mudam de estado em intervalos discretos do tempo, cuja duração pode ser variável. A ocorrência de um evento discreto pode alterar o estado do sistema simulado. Apesar de conceitualmente ser passível de cálculos manuais, a grande quantidade de dados utilizados na simulação da maioria dos sistemas, torna o uso de computadores indispensável (LAW; KELTON, 2000).

Neste sentido, Kelton, Sadowski e Zupick (2015, p.1) afirmam que “simulação se refere a uma ampla coleção de métodos e aplicativos para imitar o comportamento de sistemas reais, geralmente em um computador com *software* apropriado”. De forma análoga, Fishman (2001) diz que a SED consiste em uma coleção de técnicas que visam modelar um sistema real e a partir de um código executável ou *software* apropriado, gerar dados que representem estimativas de desempenho do sistema estudado.

Simulação é, portanto, a representação simplificada do funcionamento de um sistema a partir de um modelo, tal qual permite analisar e responder questões hipotéticas do tipo “E

se...?” sobre o valor de determinadas variáveis e a partir disso, inferir sobre o comportamento do sistema, auxiliando o processo de tomada de decisão (BANKS, 1998).

### 2.1.1 Classificação dos modelos de simulação e principais terminologias

Law e Kelton (2000) classificam os modelos de simulação em:

- **Estático ou Dinâmico:** um modelo estático representa o sistema num dado momento ou representa sistemas onde a variável tempo não é considerada. Na simulação dinâmica, o modelo é capaz de representar o comportamento do sistema ao longo do tempo;
- **Determinísticos ou Estocásticos:** os modelos determinísticos são aqueles cujas variáveis não possuem caráter aleatório, característica tal que é predominante nos modelos estocásticos, que produzem por sua vez, uma estimativa dos parâmetros dos sistemas reais;
- **Contínuos ou Discretos:** os modelos contínuos apresentam um avanço na contagem de tempo de forma contínua. Assim, os valores das variáveis podem ser determinados a qualquer momento. Já nos modelos discretos, este avanço dá-se em forma de incrementos e os valores das variáveis são definidos a partir de um determinado valor fixo ou em virtude da ocorrência de eventos.

Em simulação, os termos comumente utilizados são, de acordo com Kelton, Sadowski e Zupick (2015):

- **Entidades:** São os objetos que constituem o modelo. São classificadas em dinâmicas, quando movem-se através do sistema, ou estática, servindo à outras entidades;
- **Recursos:** São entidades estáticas que fornecem serviço às entidades dinâmicas;
- **Atributos:** São características que definem as entidades. Entidades semelhantes possuem atributos iguais da mesma forma que os atributos diferenciam as entidades não semelhantes. Além de caracterizar e individualizar as entidades, os atributos possibilitam a obtenção das estatísticas utilizadas na análise do desempenho do sistema estudado;
- **Filas:** locais onde as entidades dinâmicas aguardam por um recurso que se encontra indisponível no momento de entrada no sistema ou em processos subsequentes. As filas são gerenciadas segundo políticas operacionais adotadas

no sistema. As políticas de prioridade de atendimento são, conforme Chwif e Medina (2015):

- i. FIFO – *First-in, first-out*: o primeiro a chegar será o primeiro a ser processado;
  - ii. LIFO – *Last-in, first-out*: o último a chegar será o primeiro a ser processado;
  - iii. MTPO – Menor tempo de processamento: o item que apresentar o menor tempo de processamento será primeiramente processado;
  - iv. MDEN – Menor data de entrega: o item que apresentar a menor data de entrega, será o primeiro a ser processado;
  - v. ALEA – Aleatório: nessa política não há um critério de priorização, processando as ordens em ordem aleatória;
  - vi. FEST – Folga Estática: a folga estática se refere ao tempo restante até a data de entrega do pedido. Nessa política, serão processados inicialmente os itens que apresentarem menor folga estática.
  - vii. PRIO - prioridade baseada em atributos. Nesta, o item que apresentar maior prioridade será processado primeiro, independente do momento de chegada no sistema. Caso essa política adote o método preemptivo, o item de alta prioridade será processado, interrompendo o processamento atual. Quando finalizado, o item anterior volta a ser processado, continuando o processo a partir do ponto de interrupção ou sendo reiniciado. Já o método não preemptivo, o item de alta prioridade é direcionado para o início da fila, e será processado somente quando o processamento atual for finalizado.
- **Atividades:** demanda uma determinada quantidade de tempo para ser realizada;
  - **Evento:** acontecimentos no tempo que pode mudar o estado do sistema.

### 2.1.2 Fases de um estudo da Simulação

Conforme Banks *et al.* (2004), a metodologia aplicada aos estudos de simulação é composta dos seguintes passos:

#### 1. *Formulação do problema / Planejamento do estudo*

Nesta fase, o sistema objeto de estudo será conhecido de forma aprofundada. Informações minuciosas e precisas serão obtidas através de entrevistas informais com os membros do corpo gestor do sistema e caso a formulação do problema fique a cargo do analista, esta deverá ser compreendida e aprovada. É possível, em dadas circunstâncias, que o problema seja reformulado durante o estudo. Nesta fase também, são definidos os objetivos do estudo bem como as métricas de desempenho que irão medir a eficácia do processo.

## *2. Coleta de dados e definição do modelo*

Conforme os objetivos e metas traçados no passo anterior, os detalhes do modelo a ser desenvolvido e o tipo de dados a ser coletado serão definidos. Por se tratar de uma etapa morosa e muitas vezes dispendiosa, a coleta de dados deve se iniciar o quanto breve possível. É possível, dada a complexidade do problema tratado, que mais e diferentes dados sejam necessários e passíveis de coleta durante a execução do estudo.

## *3. Criação do modelo Conceitual*

Nesta etapa ocorre a definição das entidades, atividades do processo e suas relações. Em um estudo de modelagem se faz necessário desenvolver a priori uma modelagem conceitual que represente as interações das entidades do sistema, sendo, portanto, um modelo que abstrai a essência do sistema em estudo.

## *4. Tratamento dos dados e validação do modelo conceitual*

Nesta fase, os dados coletados deverão ser modelados de forma a considerar a aleatoriedade intrínseca do processo a partir de análises estatísticas. O modelo conceitual desenvolvido deve ser analisado e validado de modo a verificar alguma inconformidade em relação ao sistema real. Em caso de não validação, o modelo conceitual deverá ser refeito.

## *5. Construção do modelo computacional*

Os dados já tratados na fase anterior serão utilizados no modelo de simulação que poderá ser implementado em um *software* específico de simulação ou a partir códigos executáveis implementados. A conformidade do modelo computacional com o sistema real será verificada com a finalidade de garantir a representatividade necessária.

## *6. Validação do Modelo Computacional*

O modelo implementado será testado e os dados de saída serão comparados com os dados do sistema real com o objetivo de validar o modelo de simulação computacional. Técnicas estatísticas (testes) poderão ser aplicadas.

Abouelijinani, Sahin e Jemai (2013) citam algumas técnicas utilizadas para validar o modelo:

- **Validação face a face:** os gestores ou especialistas avaliam e validam o modelo;

- **Análise da sensibilidade:** consiste em se alterar alguns parâmetros de entrada para verificar se a saída do modelo se comporta como esperado;
- **Validação utilizando dados históricos:** podem ser feitos testes estatísticos para comparação de resultados simulados com dados reais.

### 7. Planejamento / Experimentação

Nesta fase, são planejados todos os cenários que se deseja simular no modelo implementado para se alcançar o objetivo do estudo. Parâmetros como duração da replicação (tempo de simulação) e número de replicações deverão ser definidos.

A partir disso, os cenários planejados com a configuração definida são rodados no modelo de simulação implementado e os resultados destes são agrupados de forma a viabilizar as análises a serem realizadas no passo seguinte.

### 8. Análise dos Resultados

Os dados obtidos a partir da simulação devem possibilitar a análise do desempenho do sistema bem como a comparação dos diferentes cenários configurados.

### 9. Geração de Relatórios

Relatórios frutos da análise dos dados obtidos da simulação são gerados. Documentos relativos ao detalhamento do modelo implementado também deverão ser criados a fim de propiciar a sua utilização em trabalhos futuros.

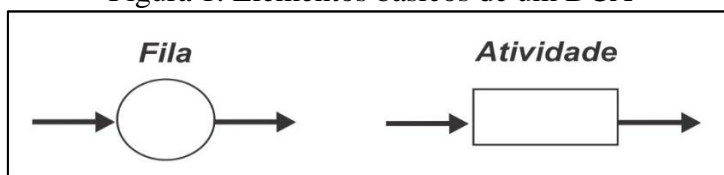
#### 2.1.3 Modelagem de Problemas de simulação

Banks (1998) diz que a conceitualização de um modelo requer conhecimento de qualidade, julgamento de engenharia e ferramentas de construção de modelo.

Diversas técnicas são utilizadas para modelar sistemas ou processos, como fluxogramas ou IDEF. Objetivando proporcionar uma modelagem orientada a simulação, Leal *et al.* (2009) propuseram o IDEF-SIM. Dentre as metodologias indicadas para abstrair as características de um sistema real, o *Activity Cycle Diagram* (ACD) ou Diagrama de Ciclos de Atividades (DCA) em português, é, em acordo com Chwif e Medina (2015), especialmente difundido no Brasil. Idealizado por Tocher (1963), trata-se de uma representação gráfica do modelo de simulação que faz uso de basicamente dois símbolos para descrever o ciclo de vida das entidades: a circunferência para representar uma fila e um retângulo, representando a atividade, conforme ilustrado pela Figura 1 (CHWIF;

MEDINA, 2015). Os autores afirmam que essa metodologia é bastante útil para representar sistemas que apresentam características fortes de geração de filas.

Figura 1: Elementos básicos de um DCA



Fonte: Chwif e Medina (2015)

Os principais elementos de um DCA são as entidades, filas e atividades que são inseridas no diagrama segundo algumas regras: deve haver alternância entre filas e atividades. Em uma fila só pode haver uma entidade e essa deve percorrer ciclos fechados (CHWIF; MEDINA, 2015). O diagrama mostra a história de vida de cada entidade e exhibe graficamente suas interações (SHEIKH; AJIELI; TAIEH, 2008).

As entidades são aqueles componentes que ao longo do ciclo, aguardam em filas ou participam de alguma atividade. Podem ser temporárias ou permanentes. Para esta segunda, deve-se definir as suas respectivas quantidades. As atividades são componentes que possuem duração predefinida (constante ou que segue uma distribuição de probabilidade) e representa o estado ativo das entidades. Dessa forma, ao participar de uma atividade, a entidade torna-se então indisponível. As filas, por sua vez, representam o estado passivo das entidades, representando o tempo que as entidades aguardam para realizar alguma atividade, tempo este, que não pode ser definido a priori (CHWIF; MEDINA, 2015).

#### 2.1.4 Principais ferramentas computacionais de simulação

Robinson (2004) afirma que os modelos de simulação podem ser implementados em planilhas eletrônicas, através de linguagem de programação ou ainda a partir de *softwares* especializados. O autor comparou estes métodos e concluiu que as planilhas, como o *Microsoft Excel*, por exemplo, apesar de rudimentares e não permitir o desenvolvimento de animações, apresenta como principal vantagem a facilidade de uso, devido a tendência de os modeladores apresentarem maior afinidade de uso dessa ferramenta.

Por outro lado, o autor destaca que as linguagens de programação proporcionam ao modelador maior flexibilidade além da melhor eficiência computacional quando comparada às planilhas e aos softwares especializados de simulação. Entretanto, o autor



apresenta como principal desvantagem, a morosidade do método, já que implementar um modelo de simulação do início é um processo incontestavelmente demorado.

Em relação aos *softwares* especializados de simulação, o autor destaca a possibilidade de construir a simulação de uma forma visual e iterativa, além desse método não requerer do modelador grandes habilidades de programação. O autor destaca ainda, que a escolha do *software* ou ferramenta será determinada pela complexidade do estudo realizado.

Prado (2015) apresenta em seu trabalho uma breve história da evolução da simulação no que se refere ao uso do computador:

- Década de 50: Os programas de simulação eram desenvolvidos com as linguagens FORTRAN e ALGOL. Nesta época, era necessário que o modelador apresentasse grande conhecimento relativos à programação;
- Década de 60: Começaram a surgir linguagens mais específicas à simulação com destaque ao GPSS, que apesar do seu poderio e facilidade de uso, não se difundiu devido às limitações dos computadores da época no que tangia a memória necessária ao processamento dos programas desenvolvidos;
- Década de 70: Conhecida como a década de ouro, devido à difusão da simulação em todo o mundo, novas linguagens foram desenvolvidas: GASP, SIMSCRIPT e EXCELSIM.
- Década de 80: Nesta década iniciou-se a era da simulação visual, onde programas comerciais como o Arena, Promodel, AutoMod entre outros foram desenvolvidos e predominam no campo da simulação até os dias atuais.

## 2.2 Otimização da Simulação

A técnica de simulação apresenta como característica, a possibilidade de se alterar os parâmetros de um modelo e observar o desempenho do sistema analisado sob diferentes configurações das variáveis de entrada. Toda análise realizada a partir desta técnica busca encontrar o conjunto de parâmetros que apresenta os melhores resultados.

Chwif e Medina (2015) afirmam que a simulação é uma ferramenta que avalia soluções e não gera soluções, ao enfatizar a importante limitação de não se apresentar um resultado ótimo. A utilização de técnicas da otimização em conjunto com a simulação computacional surge como um atenuante, apresentando uma boa solução para o problema, apesar de não garantir que esta seja ótima. Verifica-se, portanto, que a

otimização da simulação lida com situações nas quais os analistas objetivam descobrir quais as especificações do modelo resultam em melhores resultados.

Diversos métodos de soluções podem ser aplicados aos problemas de otimização. A otimização da simulação (OS) também denominada de otimização via simulação (OvS) visa definir a melhor configuração do sistema, que sujeito às restrições e limitações de recursos alcança um determinado objetivo (COELHO; PINTO, 2018). Em consonância, Carson e Maria (1997) definem otimização da simulação como o processo pela busca de melhores valores para as variáveis de entrada dentre todas as possibilidades, sem avaliar explicitamente cada possibilidade.

O problema de otimização é formulado a partir de uma função de avaliação que objetiva maximizar ou minimizar uma medida de desempenho, estando ou não sujeita a restrições que delimitam o valor que as variáveis podem assumir. Tal função visa medir a qualidade da solução. As restrições do problema podem ser também relaxadas e integradas à função de avaliação sob a perspectiva de penalidades de forma que as soluções que desrespeitem as restrições do problema não sejam consideradas como a melhor solução (FISHER, 2004).

Os fatores de modelo (parâmetros de entrada) se tornam as variáveis de decisão, no mundo da otimização. Da mesma forma, as respostas (saídas do modelo de simulação) são usadas para modelar a função objetivo e as restrições de um problema (APRIL *et al.*, 2003).

Hong e Nelson (2009) dizem que os problemas de Otimização da simulação podem ser formulados como:

$$\text{Min } \{g(x) = E_x [Y(x)]\}, \quad x \in \Theta \subset \mathfrak{R}^d \quad (1)$$

Em que  $x$  é o vetor das variáveis de decisão (solução).

A formulação busca minimizar uma função objetivo definida como o valor esperado de uma variável aleatória cuja distribuição depende da variável de decisão  $x$ . Para avaliar a função objetivo, são executados experimentos de simulação com um valor específico de  $x$  e a saída representando uma estimativa de  $g(x)$ .

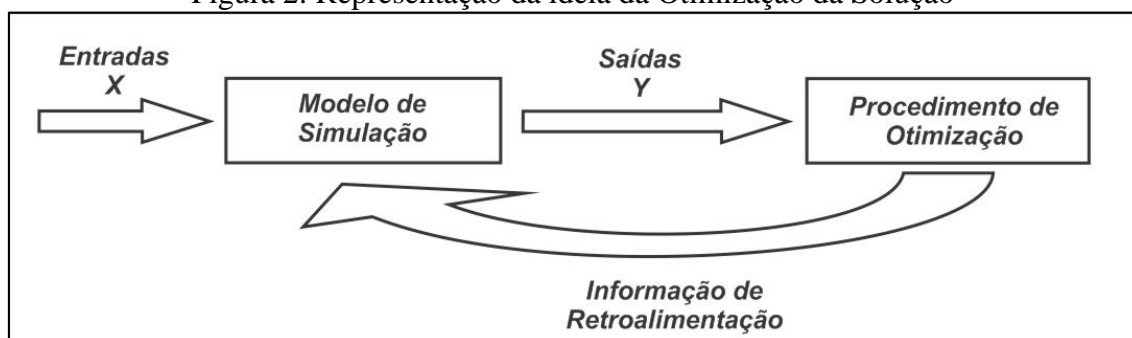
Ainda, segundo Hong e Nelson (2009), os problemas de otimização da simulação podem ser divididos em três categorias, baseadas na estrutura da região de soluções viáveis  $\Theta$ :

- i. Problemas de Classificação e Seleção: nestes problemas,  $\Theta$  possui um pequeno número de soluções (geralmente um número menor que 100) e o vetor de decisão  $x$  pode ser numérico ou categórico. É possível simular todas as soluções e selecionar as melhores dentre elas;
- ii. Problemas Contínuos: nestes problemas,  $x$  é um vetor de variáveis de decisão contínuas e  $\Theta$  é um subconjunto convexo de  $\mathcal{R}^d$ ;
- iii. Problemas Discretos: nestes problemas,  $x$  é discreto e inteiro ordenado e  $\Theta$  é um subconjunto de números d-dimensionais.

Os autores dizem que apesar dessa categorização não incluir todos os tipos de problemas de Otimização da Simulação, abrangem a maioria dos problemas práticos ou de pesquisa acadêmica.

A Figura 2 representa a ideia da Otimização da Simulação: o modelo de otimização realiza repetidas interações com o modelo de simulação, fornecendo os valores das variáveis que serão simuladas e recebendo o valor da função de avaliação. O procedimento será finalizado quando o critério de parada pré-estabelecido for alcançado.

Figura 2: Representação da ideia da Otimização da Solução



Fonte: Chwif e Medina (2015)

A otimização da simulação evita testar um grande número de cenários ou usar modelos matemáticos de otimização com muitas simplificações ou suposições irreais. Esta técnica busca convergir de maneira rápida para um ótimo ou combinação quase ideal em relação à alguma medida de desempenho de interesse que são avaliadas por meio da simulação (ABOUELIJINANAI; SAHIN; JEMAI, 2013). A otimização da simulação busca a minimização dos recursos envolvidos enquanto trabalha para maximizar as informações obtidas através do experimento computacional (CARSON; MARIA, 1997).

### 2.3 Métodos heurísticos de solução

Grande parte dos problemas reais se apresentam como problemas de alta complexidade por possuírem grandes números de variáveis. Estes são classificados como NP-difíceis por sua natureza combinatória e neste cenário, obter soluções exatas, exigem tempos de processamentos e memórias computacionais consideradas proibitivas. Neste sentido, grandes esforços foram realizados, nas últimas décadas, no desenvolvimento de métodos heurísticos que buscam apresentar como resultado, uma boa solução para o problema estudado, com eficiência computacional.

Silver (2004) enumerou as principais razões de se adotar o uso de métodos heurísticos na solução de problemas combinatórios:

- i. Facilidade de implementação;
- ii. Apresentação de resultados de forma rápida;
- iii. Apresentar resultados melhores do que são atualmente alcançados;
- iv. Robustez e flexibilidade;
- v. Possibilidade de uso dentro de rotinas de otimização.

Hong e Nelson (2009) dizem que os algoritmos de solução desenvolvidos pela comunidade de pesquisa acadêmica têm apresentado bons resultados comprovados estatisticamente. Os autores afirmam que os algoritmos desenvolvidos para solucionar os problemas de classificação e seleção, garantem encontrar a melhor solução com uma dada probabilidade ou menor custo de oportunidade. Já aqueles destinados à solução dos problemas contínuos e discretos garantem convergir para uma solução ideal (ótimo local ou global, dependendo do algoritmo) à medida que o esforço da simulação tende à infinito. Entretanto, algoritmos de otimização da simulação baseados em meta-modelos têm sido aplicados na solução de problemas contínuos enquanto algoritmos baseados em meta-heurísticas visam solucionar os problemas discretos, sem garantir a convergência à solução ótima, porém com bom desempenho empírico.

Goldbarg, Goldbarg e Luna (2016) definem heurística como uma técnica que busca alcançar uma solução para um problema considerada aceitável, abrindo mão da otimalidade, porém, com eficiência computacional e definem meta-heurísticas como algoritmos que possuem uma estratégia geral de solução, sendo apenas adaptado a cada caso específico. Silver (2004) destaca que as meta-heurísticas tem como características,

a preocupação de não “ficarem presas” a ótimos locais e/ou buscar reduzir criteriosamente, o espaço da pesquisa.

Sörensen e Glover (2013) ressaltam que o método meta-heurístico não impõe exigências quanto à formulação do problema, como por exemplo, exigir que as restrições ou a função objetivo sejam expressas como funções lineares das variáveis de decisão. Segundo os autores, alguns termos amplamente usados ao se descrever as meta-heurísticas são:

- a) Solução atual ou corrente: é a solução inicial do método ou àquela que foi obtida a partir do processo de busca local;
- b) Movimentos: são alterações aplicadas na solução corrente;
- c) Vizinhança da solução: é o conjunto de soluções obtidos através da aplicação de movimentos a uma solução;
- d) Estrutura de vizinhança: são tipos diferentes de movimentos que serão aplicados à solução atual;
- e) Estratégia: é a regra utilizada para selecionar uma nova solução corrente, por exemplo, Método da Descida / Subida (onde a melhor solução da vizinhança é selecionada) ou Primeira Melhor (onde a primeira solução que apresentar melhora no valor da função objetivo é selecionada);
- f) Ótimo local: A melhor solução dentre todas as soluções da vizinhança.

Os autores afirmam que as meta-heurísticas podem ser distinguidas em três classes fundamentais:

- **Meta-heurísticas de Busca Local:** As meta-heurísticas de Busca Local são estruturas que se baseiam principalmente na melhoria iterativa para encontrar boas soluções. As estratégias para “escapar” de um ótimo local é a principal característica que diferenciam as meta-heurísticas dessa classe. A seguir alguns exemplos de meta-heurísticas de Busca Local. A meta-heurística ILS (*Iterated Local Search*) aplica uma grande mudança aleatória à solução atual, denominada perturbação (LOURENÇO *et al.*, 2019). A meta-heurística MLS (*Multi-Start*) reinicia a pesquisa a partir de uma nova solução aleatória (MARTÍ *et al.*, 2019). Já a meta-heurística VNS (*Variable Neighborhood Search*) define diferentes estruturas de vizinhanças e as aplicam em um ótimo local. Os autores destacam que o uso de mais de uma estrutura de vizinhança é bastante comum e não restrito aos algoritmos rotulados como VNS (HANSEN *et al.*, 2019). A meta-heurística Busca Tabu (TB – *Tabu Search*) usa informações sobre o progresso passado

armazenados em memórias de curto prazo que impedem que soluções encontradas no passado ou que contenham um determinado atributo sejam novamente visitadas (GENDREAU *et al.*, 2019). A meta-heurística *Simulated Annealing* aceita soluções de piora segundo uma probabilidade como forma de escapar de ótimos locais.

- **Meta-heurísticas construtivas:** As meta-heurísticas construtivas, como o próprio nome sugere, constroem soluções a partir de seus elementos constituintes em detrimento de melhorar soluções completas, adicionando um elemento de cada vez à solução parcial. São em geral adaptações de algoritmos gulosos, que sempre adicionam o melhor elemento possível a cada iteração. Após a fase construtiva, esses métodos geralmente incluem a fase de pesquisa local. Nesta classe, os autores destacam as meta-heurísticas GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) que é um método que amortece a ganância do método construtivo, usando a randomização de um parâmetro que atualiza a lista de candidatos restritos à solução (RESENDE *et al.*, 2019) e a Otimização por Colônia de Formigas (ACO – *Ant Colony Optimization*) que constroem soluções imitando o comportamento de forrageamento das formigas (DORIGO *et al.*, 2019).
- **Meta-heurísticas de Base Populacional:** As meta-heurísticas baseadas em população encontram boas soluções ao selecionar iterativamente e depois combinar as soluções existentes de um conjunto, geralmente chamados de população. Nessa classe estão os algoritmos evolutivos (EA – *Evolutionary Algorithms*) que são inspirados nos princípios da evolução natural. Os algoritmos evolutivos utilizam dois mecanismos na busca por boas soluções: a seleção de soluções de alta qualidade de forma predominante e a recombinação destas. Nesta classe encontram-se as meta-heurísticas como Algoritmos Genéticos (GA – *Genetic Algorithms*), Programação Genética / Evolutiva (*Genetic / Evolutionary Programming*) e a Computação Evolutiva (*Evolutionary Computation*) (LEE; YANG, 1998; WHITLEY, 2019).

Os *softwares* comerciais de simulação utilizam-se de meta-heurísticas em seus pacotes de otimização. Como forma de integrar a simulação com a otimização, os softwares AutoMod e Promodel fazem uso da meta-heurística Algoritmos Genéticos, o Arena e o

SIMUL8 aplicam Rede Neurais, enquanto o software *Witness* utiliza o *Simulated Annealing* (LAW; KELTON, 2000).

Trabalhos que comparam as performances dos pacotes de otimização de *softwares* comerciais (LAW; MCCOMAS, 2002; ESKANDARI *et al.*, 2011) demonstraram que o pacote baseado em *Simulated Annealing* apresentou desempenho similar, com tempo computacional aceitável, quando comparado aos demais.

A metaheurística *Simulated Annealing* (SA) foi proposta por Kirkpatrick *et al.* (1983). Trata-se de um método de otimização que se inspira numa analogia com a termodinâmica, conhecido como recozimento simulado. Este processo, amplamente utilizado no setor metalúrgico, busca elevar a temperatura dos metais à valores superiores a 1000°C e posteriormente resfriá-lo de forma lenta e controlada, no intuito de obter estruturas mais fortes e estáveis, menos propensas a defeitos.

Em geral, os problemas do mundo real que são modelados como problemas de análise combinatória são considerados intratáveis devido ao astronômico número de soluções possíveis. O conjunto de todas as soluções possíveis de um problema, constitui o espaço de busca e vizinhança de uma solução é o conjunto de todas as soluções derivadas dessa, segundo uma regra (VASQUEZ, 2017; MWESHI; PILLAY, 2021).

A busca local, é uma técnica utilizada para tratar problemas NP-Hard, apresentando uma solução sub-ótima ao problema. Esta técnica consiste em mover-se de uma solução para outra, segundo alguma regra, denominada estrutura de vizinhança (PANTUZA JR., 2011; CHEN; PAN; GAO, 2021).

O SA é estruturado com um método de busca local probabilístico, que busca melhorar a solução do problema a partir de movimentos condizentes a uma estrutura de vizinhança, em sucessivas iterações, até que um ótimo local seja encontrado.

Como estratégia para escapar de ótimos locais, no método aceita-se soluções de piora, segundo uma probabilidade. A temperatura, inicialmente, assume valores altos. Após determinado número de iterações, o valor da temperatura vai gradativamente diminuindo, segundo uma função ou taxa de resfriamento. Assim, à medida que a temperatura vai tendendo a zero, a probabilidade de se aceitar soluções de piora diminui. Neste cenário, o método se comporta de forma a só realizar o movimento, se esse resultar em melhora na função de avaliação (DÍAZ, 2007).

A Figura 3 apresenta o pseudocódigo do método para um problema de minimização.

Figura 3: Pseudocódigo do SA para um problema de minimização

```

algoritmo SA ( $T_0, SA_{max}, \alpha$ )
  gere uma solução inicial  $s$ 
   $IterT \leftarrow 0$ 
   $T \leftarrow T_0$ 
  enquanto (critério de parada não for satisfeito) faça
    enquanto ( $IterT < SA_{max}$ ) faça
       $IterT \leftarrow IterT + 1$ 
      gere um vizinho  $s'$  aleatoriamente ( $s' \in N(s)$ )
      calcule  $\Delta = f(s') - f(s)$ 
      se ( $\Delta \leq 0$ ) então
         $s \leftarrow s'$ 
      senão
         $s \leftarrow s'$  com probabilidade  $e^{-\Delta/T}$ 
    fim-enquanto
     $T \leftarrow \alpha \times T$ 
     $IterT \leftarrow 0$ 
  fim-enquanto
fim-algoritmo

```

Fonte: Higino *et al.* (2012)

Neste método, após alcançado um determinado critério de parada, que pode ser definido em termos de tempo de execução, número máximo de iterações sem alcançar melhora na função de avaliação, ou ainda, um número máximo de iterações, o método é encerrado, retornando a melhor solução encontrada.

#### 2.4 Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU 192)

A ideia inicial de atendimento pré-hospitalar se deu em 1792, quando o médico cirurgião francês, Dominique Larrey observou que as chances de sobrevivência dos feridos em combate eram maiores caso o atendimento prestado fosse realizado de forma rápida, ainda no campo de batalha (SANTANA; BOERY; SANTOS, 2009).

No Brasil, o atendimento pré-hospitalar passou a ser sustentado por normatizações a partir do ano de 1998, quando equipes de saúde, coordenadas por médicos, assumiram a liderança do processo. No período anterior, existiam parcerias entre o Corpo de Bombeiros e as secretarias de saúde municipais ou estaduais, numa articulação entre bombeiros militares e médicos (PEREIRA; LIMA, 2009).

Como forma de atender com maior eficiência a alta demanda de urgências em saúde brasileira, foi criada a Política Nacional de Atenção às Urgências (PNAU) através da Portaria GM/MS nº 1863 de 29 de setembro de 2003 posteriormente reformulada pela



Portaria GM/MS nº 1600 de 07 de julho de 2011. A PNAU é composta pelos serviços de atendimento pré-hospitalar móvel e fixo, atendimento hospitalar e pós-hospitalar.

Neste cenário, surgiu o SAMU, instituído em 2003, através da Portaria GM/MS nº 1864, e normatizado pelo Decreto Presidencial nº 5055 de 27 de abril de 2004, com a responsabilidade de ser componente fundamental da PNAU, prestando o atendimento pré-hospitalar móvel. Trata-se de um serviço gratuito que objetiva garantir a universalidade do acesso e a equidade na alocação dos recursos.

Com equipes formadas por médicos, enfermeiros, auxiliares de enfermagem, condutores socorristas, telefonistas e radio-condutores, o sistema busca prestar atendimento precoce à vítima em situações de urgência ou emergência, realizando atendimento em residências, locais de trabalho ou vias públicas (BRASIL, 2002).

Dick (2003) classifica, em seu trabalho, os Sistema de Emergência Médica como de origem Franco-Alemão ou Anglo-Americano. Os sistemas do grupo Anglo-Americano, como os sistemas da América do Norte, objetivam realizar o transporte rápido e seguro do paciente até a unidade médica apropriada. Já nos sistemas com características Franco-Alemãs, os pacientes em estado de emergência são atendidos no local de ocorrência e durante o transporte.

As operações do SAMU seguem o modelo francês, onde as vítimas são atendidas no local de ocorrência do evento, não sendo restrito portanto, ao transporte de pacientes (SILVA, 2010).

## **2.5 Aplicações de Técnicas da Pesquisa Operacional em Serviços Médicos**

Verifica-se nas últimas décadas, um grande interesse da comunidade acadêmica de Pesquisa Operacional nos sistemas de Serviços Médicos, de forma especial, o SME, que têm sido estudados a partir das mais diversas técnicas de otimização e simulação. Pinto, Silva e Young (2015) afirmam que as características próprias deste tipo de sistema, o torna adequado a ser modelado.

Nas subseções seguintes, serão apresentados trabalhos relevantes que tratam problemas oriundos de sistemas de emergência médica, a partir de várias técnicas da pesquisa operacional.

### 2.5.1 Programação Linear (PL) em Sistemas Médicos

A localização de veículos de emergência médica é comumente estudada via programação linear inteira, utilizando os modelos clássicos da p-mediana, p-centro ou cobertura, em sua essência ou modificados para adequar a algum objetivo específico (DIBENE *et al.* 2017; MAGHFIROH; HOSSAIN; HANAOKA, 2017; NILSANG *et al.*, 2018; KARATAS; YAKICI, 2019).

Schneeberger *et al.* (2014) utiliza a otimização determinística para estudar um SME sob a perspectiva de um cenário de crise, onde pacientes de urgência regular recebem atendimento pré-hospitalar de forma simultânea às vítimas de grandes incidentes ou desastres naturais, a partir de um modelo de cobertura dupla.

Dibene *et al.* (2017) estudaram um SME de Tijuana, México e a partir do modelo de localização proposto, concluíram que o tempo de resposta atual do sistema pode ser consideravelmente minimizado através da realocação das bases das ambulâncias.

Maghfiroh, Hossain e Hanaoka (2017) estudaram o SME de Dhaka, Bangladesh. Os autores aplicaram o modelo de localização com máxima cobertura com o objetivo de maximizar a área coberta a uma distância limite de 5 km e o modelo da p-mediana no intuito de minimizar a distância percorrida pelos veículos considerando horários de maior e menor movimento na cidade. Os resultados apontaram que reposicionar as ambulâncias próximas aos pontos de demanda, ao contrário de localizá-las em hospitais, reduziria consideravelmente o tempo de resposta, apesar do mesmo ser bastante superior ao preconizado pelas organizações internacionais de saúde.

Nilsang *et al.* (2018) propõe um modelo de máxima cobertura com localização forçada, que utiliza como dados de entrada informações oriundas de uma rede social (Twitter) e validam seu método utilizando dados reais do SME de Bangkok, Tailândia. O modelo de alocação dinâmica proposta pelos autores, não visa uma realocação de veículos para um local onde espera-se ocorrer um aumento de demanda em determinado momento. Esta só ocorre em casos de demandas reais, o que segundo os autores, torna o sistema eficaz e menos oneroso.

Karatas e Yakici (2019) propõem um refinamento do modelo clássico da p-Mediana, denominado Backup p-Mediana (BpMP), que objetiva minimizar a distância entre recursos primários e de *backup*. Os autores testaram o método em instâncias de diferentes tamanhos gerados aleatoriamente e a partir da combinação do método analítico com

simulação de eventos discretos, analisaram três políticas de atribuições diferentes: (1) atribuir uma demanda apenas às instalações  $K$  mais próximas e não considerar clientes no caminho, (2) atribuir demanda a qualquer instalação e não considerar clientes no caminho e (3) atribuir uma demanda a qualquer instalação e considerar os clientes a caminho. Os resultados demonstraram a forte ligação do nível de serviço de *backup* com o tamanho da demanda e número de servidores e que a melhoria obtida a partir do serviço de *backup* se tornam menores quando a demanda excede um determinado nível.

Com o objetivo de avaliar o estado da arte, Bélanger, Ruiz e Soriano (2019) apresentam uma revisão e discutem os recentes avanços na literatura no que tange aos modelos de otimização para o gerenciamento de frotas de SME.

### **2.5.2 Modelos de Filas aplicados a problemas de SME**

Os serviços médicos têm sido também amplamente estudados via modelo de filas.

Davoudpour, Mortaz e Hosseinijou (2013) estudam o SME da cidade de Teerã – Irã, através da combinação do modelo de localização de Máxima Cobertura Esperada (MEXCLP) com um modelo Hipercubo de filas.

Souza *et al.* (2015) estenderam o modelo hipercubo baseado em teoria das filas espacialmente distribuídas para analisar o SME de Ribeirão Preto – Brasil, sob a ótica de múltiplas classes de prioridades.

Xie *et al.* (2015) utilizam um modelo de filas para estudar o sistema de saúde sob a perspectiva da triagem reversa (situação em que pacientes menos feridos tem prioridade de atendimento em detrimento daqueles pacientes com estado de saúde mais crítico).

Almehdawe, Jewkes e He (2016) utilizam a teoria das filas para analisar o SME sob o ponto de vista do tempo de entrega do paciente aos cuidados hospitalares, justificada pelo considerável tempo em que as ambulâncias ficam paradas aguardando a liberação de suas macas. Propuseram um modelo de otimização que visa a melhor distribuição de pacientes dentre os hospitais receptores de pacientes oriundos de urgências. O método foi validado através da simulação.

Hu, Barnes e Golden (2017) afirmam que são ferramentas importantes a serem utilizadas nos estudos de operações de sistemas de emergência médica. Os autores desenvolveram um trabalho onde apresentam uma revisão de trabalhos que aplicaram modelos de filas

em estudos de departamentos médicos destacando os pontos fortes e limitações dessa metodologia.

Jang e Lee (2019) combinaram o modelo de localização hierárquica com a teoria das filas, para apresentar um plano de alocação ideal para as unidades de tratamento intensivo neonatal na Coreia.

### **2.5.3 Análise de SME utilizando Simulação e simulação via Otimização**

Um sistema médico de emergência pode ser representado como um sistema de fila única com diversos servidores controlados por uma central. A aleatoriedade relativa à localização do chamado, do tempo de viagem, atendimento e deslocamento para uma unidade de saúde, bem como a disponibilidade de uma ambulância, dificultam a modelagem analítica, tornando a análise a partir da técnica de simulação bastante atraente (SILVA, 2010).

Aringhieri, Carello e Moralle (2013) avaliaram o desempenho do SME de Milão, Itália, a partir de modelagem estatística e programação matemática. Utilizaram a SED para analisar os resultados obtidos pelos modelos, considerando as aleatoriedades dos dados. Os resultados demonstraram que a taxa de sucesso (número de chamados atendidos dentro do prazo máximo de 8 minutos) seria maximizado simplesmente aumentando a disponibilidade das ambulâncias. Essa maior disponibilidade seria obtida a partir da atribuição de um novo chamado à ambulância que estava retornando para a sua base, ao contrário do que era praticado no sistema a época do estudo, que só considerava a ambulância como disponível, no momento em que ela estivesse em sua base.

Aboueljine *et al.* (2014) desenvolveram um modelo com objetivo de melhorar um SME francês, avaliando duas métricas de desempenho – (i) cobertura, que analisa o número de chamados cobertos em até vinte minutos e (ii) taxa de utilização de recursos, avaliado pela razão entre a carga de trabalho da equipe e o tempo total de operação. Os resultados demonstraram que a descentralização das bases, alocando as equipes em locais estratégicos aumentariam a taxa de sucesso do sistema em aproximadamente cinco pontos percentuais.

Zhen *et al.* (2014) fazem uso da otimização da simulação para solucionar o problema de implantação de um SME, incorporando a meta-heurística Algoritmo Genético ao modelo de Simulação. Propuseram um modelo matemático de realocação de ambulâncias e submetem a este método, os dados reais do SME de Xangai, China, dividindo o período

de um dia em cinco faixas horárias. Apresentaram como resultado a configuração do sistema estudado considerando fatores como tráfegos dependentes de condições temporais e espaciais.

Nogueira Júnior, Pinto e Silva (2014) avaliaram o SME de Belo Horizonte, Brasil, a partir de um modelo matemático proposto. Com a técnica determinística, os autores verificaram que seria possível minimizar o tempo de resposta do sistema a partir de uma nova configuração da frota, com um número menor de bases ativas e com a realocação de ambulâncias. Diferentes cenários foram então submetidos a um modelo de simulação nos quais os resultados apontaram para uma redução do tempo de resposta do sistema de forma simultânea à redução dos custos totais do sistema, em virtude da diminuição do número total de bases.

Keshkar, Salimifard e Faghieh (2015) fizeram uso de um modelo para simular a unidade de pronto atendimento de um hospital iraniano, com o objetivo de minimizar o tempo de permanência hospitalar. Os dados de saída obtidos da simulação, alimentavam a entrada de um modelo matemático proposto. Os resultados do estudo demonstraram que o aumento de recursos humanos (médicos e enfermeiros) do sistema reduziria em aproximadamente 10% o tempo de permanência dos pacientes no ambiente hospitalar.

Pinto, Silva e Young (2015) afirmam que apesar da maioria dos estudos de simulação propor modelos que atendem as especificidades de um sistema médico em particular, percebe-se que estes sistemas apresentam características comuns. Assim, propuseram um modelo de simulação reutilizável para sistemas de ambulância. Validaram o modelo através do estudo do SAMU de Belo Horizonte e confirmaram a reusabilidade aplicando-o num cenário real do Reino Unido.

McComack e Coates (2015) realizaram um estudo no SME de Londres utilizando a Otimização da Simulação. Integraram ao modelo a meta-heurística Algoritmo Genético. Os resultados do estudo demonstram que a otimização da localização da frota, sem aumento de recursos, aumentava a taxa de sobrevivência de pacientes com parada cardíaca. Os autores apontaram também que a remoção estratégica de uma base apresenta pouco impacto na probabilidade de sobrevivência.

Ünlüyurt e Tunçer (2016) avaliaram o SME de Istambul aplicando os dados reais do sistema aos modelos de localização de Máxima Cobertura (MCML) e Dupla Cobertura (BDCM). Com vistas de corrigir algumas deficiências encontradas, propuseram outros

dois modelos de localização – o MSRSCLM (Modelo de Localização Máxima de Conjunto de Serviço Restrito a Serviços) e o CFRM (Modelo de Proporção Final Centralizada), avaliando os resultados dos modelos através da simulação, sob duas diferentes políticas de despacho. Aos modelos, também foram submetidos dados de instâncias geradas aleatoriamente. Os resultados demonstram que o MCML fornece melhores resultados quando comparados com os demais modelos e que bons resultados obtidos por meios determinísticos podem não apresentar bom desempenho quando simulados, demonstrando a importância de uma avaliação baseada em simulação.

Zaffar *et al.* (2016) fazem uso da otimização de simulação para propor um modelo de análise de desempenho de um SME sob diferentes métricas. Utilizaram a meta-heurística Busca Tabu Reativa (RTS) para otimizar e comparar três diferentes objetivos: maximizar a cobertura, minimizar o tempo de resposta médio e maximizar a capacidade de sobrevivência. Submeteram ao modelo dados reais de chamadas de emergência. Os resultados demonstraram que o objetivo máximo de sobrevivência é estatisticamente melhor quando comparado aos demais. Diante dos testes realizados, os autores concluíram que os gestores de SME com frotas reduzidas (pequeno número de ambulâncias) devem adotar o objetivo de capacidade de sobrevivência em detrimento do menor tempo de resposta, ao solucionar os problemas de configuração do sistema.

Bélanger *et al.* (2020) propuseram uma estrutura de otimização da simulação capaz de abordar o Problema de Localização e Despacho de ambulância (*Ambulance Location and Dispatching Problem – ALDP*). O objetivo do modelo proposto pelos autores era avaliar a disponibilidade das ambulâncias e as medidas de desempenho do sistema, a partir de estimativas resultantes da simulação. Propuseram e compararam duas abordagens de aproximação de disponibilidade das ambulâncias, baseada na distribuição de Bernoulli e Teoria das filas. Os resultados dos testes aplicados demonstraram a eficiência do método para se obter menores tempos de respostas quando se integra as decisões de localização e despacho.

Golabian *et al.* (2021) desenvolveram uma estrutura de otimização da simulação para solucionar o problema de localização estratégica de bases de ambulâncias de SME's, utilizando a meta-heurística *Simulated Annealing*. Os autores propuseram um modelo onde a ambulância despachada, não necessariamente retornaria para sua base de origem ao final do atendimento. Para tanto, duas estratégias de prioridade de retorno, sendo a estação vazia mais próxima ou a de maior demanda, foram aplicadas, objetivando

maximizar a cobertura dentro de um tempo limite. Aplicaram ao modelo proposto, os dados de um estudo de caso realizado anteriormente, sobre o sistema EMS do Condado de Hannover, obtendo-se melhores resultados e validando a eficiência do método na solução de problemas de grande porte.

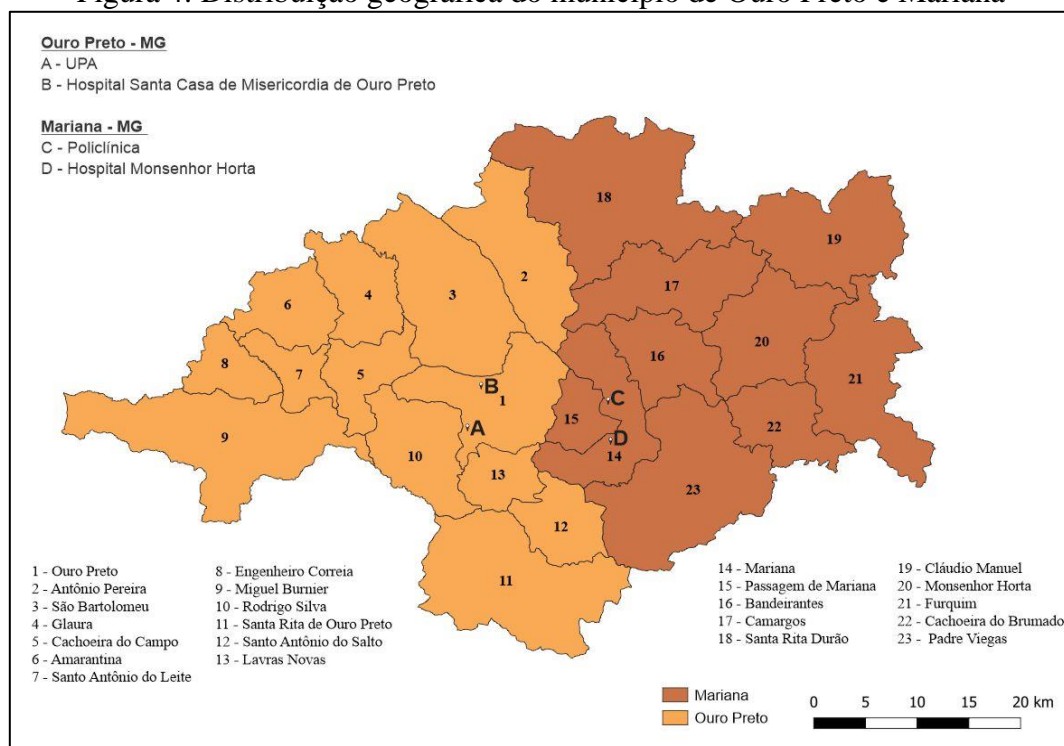
### 3. O SISTEMA ESTUDADO

Nesta seção, é apresentado o sistema de emergência médica estudado, destacando suas características e políticas aplicadas.

#### 3.1 O SAMU das cidades de Ouro Preto e Mariana

O SME, objeto de estudo desta pesquisa, possui sedes situadas em Ouro Preto e Mariana, duas das cidades mais antigas de Minas Gerais. A área territorial dos municípios totaliza 2.440,073 Km<sup>2</sup> com uma população total 124.500 habitantes (IBGE, 2020). O município de Ouro Preto é composto por treze distritos além da sede. A concentração populacional dos distritos ouropretanos totaliza aproximadamente 42% da população total, enquanto o total de habitantes dos dez distritos marianenses equivalem a 28,13% (IBGE, 2020). A Figura 4 ilustra as distribuições geográficas das áreas cobertas pelo sistema, bem como a localização das unidades de saúde dos municípios.

Figura 4: Distribuição geográfica do município de Ouro Preto e Mariana



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021)

Miguel Burnier, distrito de Ouro Preto, não foi considerado ao se realizar a análise do sistema, devido ao fato de não ter ocorrido nenhum atendimento de urgência no período de coleta de dados. Conforme informações dos gestores do sistema, os chamados originados neste distrito são direcionados ao SME do município de Congonhas, por esse proporcionar uma resposta mais rápida diante da proximidade geográfica.



Verificou-se a partir dos dados coletados, o baixo número de chamados atendidos pelo sistema em estudo nos distritos de Furquim, distrito marianense e Engenheiro Correia, distrito ouropretano. De acordo também com as informações dos gestores do sistema, isso se deve ao fato dos chamados desses distritos serem parcialmente atendidos pelos SME dos municípios de Acaiaca e Itabirito, respectivamente.

Com o objetivo de representar com maior precisão o sistema estudado e para fins de simplificação, os bairros das sedes dos municípios e os distritos foram agrupados formando microrregiões aqui denominadas de células. Na definição das células foram levados em consideração aspectos como localização, complexidade geográfica e padrão do comportamento relativos à frequência de chamados. Tabela 1 apresenta a composição das células.

Tabela 1: Agrupamento dos pontos de demanda em células

<i>Célula</i>	<i>Pontos de Demanda</i>
1	Ouro Preto
1.1	Passa Dez de Baixo, Jacuba, São Cristóvão, UPA (Base), Lages, Cabeças
1.2	Nossa Senhora de Lourdes, Vila São Jose, Água Limpa, Nossa Senhora do Rosário, Jardim Alvorada
1.3	Nossa Senhora do Pilar, Centro, Antônio Dias
1.4	Barra, Vila Aparecida, Lagoa, Morro do Cruzeiro
1.5	Pocinho, Vila Itacolomy, Hospital Santa Casa, Nossa Senhora do Carmo, Novo Horizonte
1.6	Vila dos Engenheiros, Vila dos Operários, Saramenha, Tavares, Barcelos
1.7	Nossa Senhora das Dores, Padre Faria, Santa Cruz
1.8	Alto da Cruz, Taquaral, Nossa Senhora da Piedade
1.9	Morro São Sebastiao, Morro São João, Morro da Queimada, Morro Santana, Caminho da Fábrica
2	Amarantina, Cachoeira do Campo (Base), Glaura, Engenheiro Corrêa, São Bartolomeu e Santo Antônio do Leite
3	Lavras Novas, Rodrigo Silva, Santo Antônio do Salto e Santa Rita de Ouro Preto
4	Mariana
4.1	São Cristóvão, Vila Maquiné, Jardim dos Inconfidentes, Vila Aparecida, Morada do Sol
4.2	Cabanas, Santa Rita de Cássia, Santa Clara
4.3	Estrela do Sul, Nossa senhora Aparecida, São Sebastião
4.4	Barro Preto (base), Fonte da Saudade, Rosário, Marília de Dirceu, Galego, Santana, Cruzeiro do Sul
4.5	Santo Antônio, São Gonçalo, Centro, Vila do Carmo, São Pedro
4.6	São José , Vale Verde, Cartucha, São Vicente
5	Passagem de Mariana, Liberdade, Vila São Vicente
6	Antônio Pereira, Vila Samarco, Bandeirantes, Camargos e Santa Rita Durão
7	Águas Claras, Cachoeira do Brumado, Cláudio Manuel, Furquim, Monsenhor Horta e Padre Viegas

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

O serviço de atendimento móvel local conta atualmente com quatro ambulâncias. O Quadro 1 apresenta as informações referentes as ambulâncias do sistema. As unidades do tipo USB prestam atendimento àqueles casos em que não há risco eminente de morte, enquanto a unidade do tipo USA presta atendimento exclusivo aos pacientes em estado de saúde grave, que apresentam alto risco de morte.

Quadro 1: Relação de ambulâncias do SAMU de Ouro Preto / Mariana

<b>Nome</b>	<b>Tipo</b>	<b>Município</b>
USA 0009	Unidade de Suporte Avançado	Ouro Preto
USB 7555	Unidade de Suporte Básico	Ouro Preto
USB 7556	Unidade de Suporte Básico	Ouro Preto
USB 7557	Unidade de Suporte Básico	Mariana

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

A configuração atual do sistema possui 3 bases descentralizadas: uma base localiza-se na Unidade de Pronto Atendimento de Ouro Preto (UPA-OP), onde ficam alocadas as USA 0009 e a USB 7555; a segunda base, em Cachoeira do Campo, alocando a USB 7556. A terceira base é localizada na Policlínica Municipal de Mariana e aloca a USB 7557. Vale ressaltar que no ano de 2017, período de coleta de dados, ocorreu a reconfiguração do sistema. Anteriormente, as três ambulâncias do município de Ouro Preto ficavam alocadas na base localizada na UPA-OP.

As chamadas de urgências originadas na região de Ouro Preto e Mariana são atendidas e reguladas na Central de Regulação de Belo Horizonte, desde o ano de 2015. Os chamados são classificados pelo Médico Regulador em dois tipos: chamados do tipo “A”, atendidos preferencialmente pela USA 0009, e os chamados tipo “B”, onde é disponibilizado uma unidade USB para realizar o atendimento.

Enquanto sistema centralizado, a política de despacho utilizada era a resposta por unidade disponível mais próxima. A Tabela 2 elucida o comportamento do sistema sob essa política operacional e apresenta a ordem de prioridade de designação da ambulância para atender cada célula. Por exemplo, os chamados avançados da célula 1 são preferencialmente atendidos pela USA 0009. Em caso de indisponibilidade, será despachada de forma aleatória a ambulância USB 7555 ou USB 7556 e por fim, como quarta prioridade, será designada a ambulância USB 7557 para realizar o atendimento.

Tabela 2: Política de despacho de ambulâncias no sistema centralizado

Chamados Avançados					Chamados Básicos				
Célula	Política de prioridade				Célula	Política de prioridade			
	1º	2º	3º	4º		1º	2º	3º	4º
1	USA 0009	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	USB 7557	1	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	USB 7557	-
2	USA 0009	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	USB 7557	2	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	USB 7557	-
3	USA 0009	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	USB 7557	3	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	USB 7557	-
4	USA 0009	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	4	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	-
5	USA 0009	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	5	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	-
6	USA 0009	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	6	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	-
7	USA 0009	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 ou USB 7556	7	USB 7557	USB 7555 ou USB 7556	USB 7555 + ou USB 7556	-

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Após setembro de 2017, quando uma nova base foi criada em Cachoeira do Campo, adotou-se a política de resposta regionalizada. Assim, cada base/equipe é designada a atender uma área específica. Em caso de indisponibilidade, a unidade mais próxima disponível é então despachada. A política de resposta regionalizada apresenta a vantagem de possuir tempos de viagens menores devido a limitação da área geográfica que a equipe deve percorrer além da maior familiaridade do condutor com a rede viária da zona atribuída (ABOUELIJINANI; SAHIN; JEMAI, 2013).

A Tabela 3 apresenta a nova política adotada. As políticas de despacho adotadas pelo sistema demonstram que as unidades do município de Ouro Preto são designadas a prestar atendimento no município de Mariana, enquanto o contrário não acontece. Demonstram também que, em caso de indisponibilidade da USA 0009 e havendo uma ocorrência do tipo “A”, uma unidade USB disponível será enviada. O contrário, não procede. Em caso de indisponibilidade total, o chamado aguarda em fila, até que uma unidade finalize o atendimento corrente.

Tabela 3: Política de despacho de ambulâncias no sistema descentralizado

Células	Chamados Avançados				Células	Chamados Básicos			
	Política de prioridade					Política de prioridade			
	1º	2º	3º	4º		1º	2º	3º	4º
1	USA 009	USB 7555	USB 7556	-	1	USB 7555	USB 7556	-	-
2	USA 009	USB 7556	USA 7555	-	2	USB 7556	USB 7555	-	-
3	USA 009	USB 7555	USB 7556	-	3	USB 7555	USB 7556	-	-
4	USA 009	USB 7557	USB 7556	USB 7555	4	USB 7557	USB 7556	USB 7555	-
5	USA 009	USB 7557	USB 7556	USB 7555	5	USB 7557	USB 7556	USB 7555	-
6	USA 009	USB 7557	USB 7556	USB 7555	6	USB 7557	USB 7556	USB 7555	-
7	USA 009	USB 7557	USB 7556	USB 7555	7	USB 7557	USB 7556	USB 7555	-

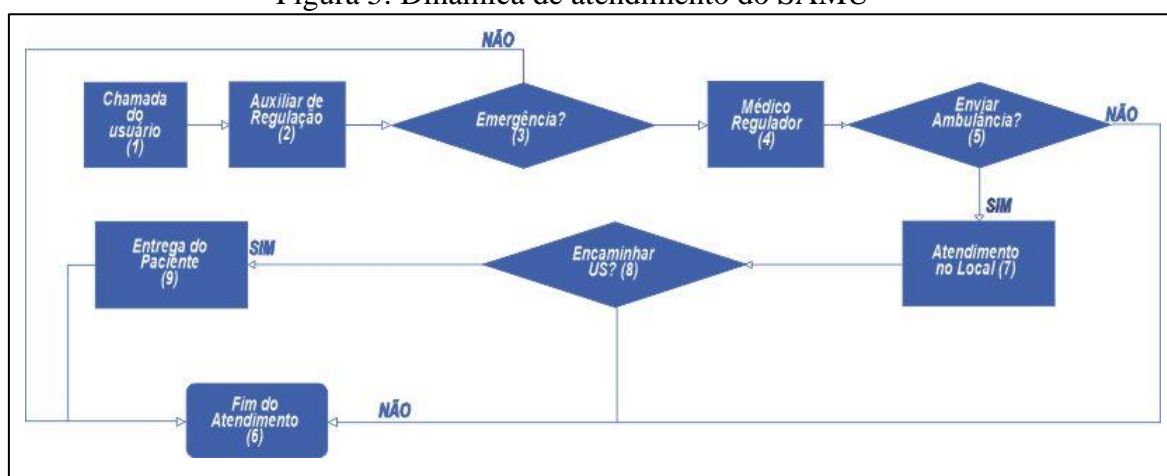
Fonte: Dados da pesquisa (2021)

### 3.2 O processo de atendimento do SAMU

O processo de atendimento realizado pelo sistema objeto de estudo é representado pela Figura 5.

O usuário tem acesso ao serviço a partir de uma chamada telefônica gratuita, através do número 192 (1). Um telefonista auxiliar de regulação médica identifica o tipo de socorro solicitado, colhe dados de identificação e localização do paciente (2). Nessa triagem são caracterizadas as ligações e aquelas classificadas como engano, ligações falsas (trotes) ou somente informação são prontamente encerradas (3).

Figura 5: Dinâmica de atendimento do SAMU



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021)

Caso a ligação seja de fato uma situação de urgência ou emergência, essa então é transferida para um médico regulador que avalia a gravidade da situação através de protocolos técnicos e define o atendimento necessário, que pode ser uma orientação por telefone ou o encaminhamento de uma unidade móvel ao local da ocorrência (4).

Caso o médico regulador entenda como não necessário o envio de uma ambulância, o atendimento é finalizado, tornando-se disponível para o atendimento de uma nova chamada. Caso contrário, baseando-se nas políticas de despacho do sistema, o médico regulador define qual tipo de unidade móvel será designada (5). O sistema conta com dois tipos de ambulância – USA (Unidade de Suporte Avançado), que é designada para atender aqueles chamados cujo atendimento seja classificado como do tipo A (alta gravidade, com risco de morte) e a USB (Unidade de Suporte Básico), que é destinada a prestar atendimento em casos em que não exista alta gravidade, mas ainda requer atenção - atendimentos do tipo B.

Em acordo com a política de despacho praticada no sistema, o despachante localiza e designa uma ambulância para realizar o atendimento. Vale salientar que, caso todas as unidades móveis do sistema estejam ocupadas, a chamada aguarda em uma fila imaginária até que haja a disponibilidade de atendimento. Em caso de haver a necessidade de despacho de uma unidade USA, e essa não estando disponível, uma unidade USB disponível será designada. O contrário não procede, ou seja, havendo disponibilidade da unidade USA para um atendimento classificado como do tipo B, esta não será despachada, e o chamado então aguardará em fila de espera até que uma unidade do tipo USB esteja disponível.

Chegando ao local da ocorrência, o atendimento é iniciado (7). Sob a perspectiva da gravidade real do paciente, verificada *in loco*, pode ser necessário remover o paciente para uma unidade de saúde. Neste cenário, a equipe informa ao médico regulador as condições atuais do paciente e com base nessas, o médico regulador define se há necessidade de encaminhar o paciente para uma unidade de saúde. Verificada a necessidade de transferência, o médico regulador define a unidade de destino e realiza contato com serviço médico receptor para que a equipe local se prepare para receber o paciente. Caso contrário, o atendimento é finalizado e a ambulância envolvida se torna disponível para atender um novo chamado que porventura esteja aguardando em fila ou para retornar à sua base em situação contrária (8).

Na situação de transferência para uma unidade de saúde, após a entrega do paciente aos cuidados da unidade de saúde, preenchimentos da documentação protocolar (9) e os devidos cuidados com o veículo (reposição de materiais, limpeza e pequenas manutenções), a ambulância estará novamente disponível e será designada ao local de

ocorrência, caso exista uma chamada em espera. Se contrário, o veículo retorna para a sua base.

## 4 SIMULANDO O SISTEMA ESTUDADO

Nesta seção, é apresentado o modelo de simulação desenvolvido bem como os principais resultados obtidos da análise de diferentes cenários.

### 4.1 Formulação do Problema

Abouelijnani, Sahin e Jemai (2013) classificam as decisões relativas aos SME em três categorias: (1) Decisões de longo prazo, que se referem à definição do nível de serviço além dos objetivos de níveis sociais econômicos, definindo portanto a habilidade e quantitativo necessário de recursos humanos a serem contratados, recursos materiais a serem adquiridos, área a ser coberta, entre outras; (2) Decisões de médio prazo, que são relativas aos problemas de localização das ambulâncias que definem simultaneamente, o local de instalação das bases, bem como o número de equipes a serem alocadas em cada base, de forma a alcançar um nível de serviço predeterminado; (3) Decisões de curto prazo que são representadas pelas políticas de despacho das ambulâncias, escolha do hospital de destino apropriado às necessidades do paciente bem como decisões de reposicionamento temporário das ambulâncias, conhecido como problema de realocação de veículos. Os autores realizaram uma revisão da literatura existente sobre modelos de simulação aplicados a sistemas médicos de emergências nas últimas quatro décadas. Os resultados da pesquisa apontaram que 59% dos trabalhos revisados trataram de problemas de implantação, 41% do total lidaram com problemas de dimensionamento de recursos e 8% buscaram apresentar solução para problemas de agendamento de turnos.

O problema desta pesquisa se fundamenta na análise de desempenho de um SME já existente. Diferentes configurações de localizações de base e número de equipes alocadas serão analisadas, se enquadrando dessa forma, diante da classificação supracitada, em um problema de decisões de médio prazo. Cenários com diferentes políticas de despacho bem como alocações dinâmicas de veículos também serão avaliados, se mostrando também como um problema de decisão de curto prazo.

Abouelijnani, Sahin e Jemai (2013) afirmam que o desempenho de um SME pode ser medido utilizando métricas relacionados a pontualidade, taxa de sobrevivência e custos. Neste trabalho, serão avaliadas as métricas de pontualidade, com enfoque ao tempo de resposta e a taxa de utilização do veículo.

## 4.2 Coleta e tratamento de dados

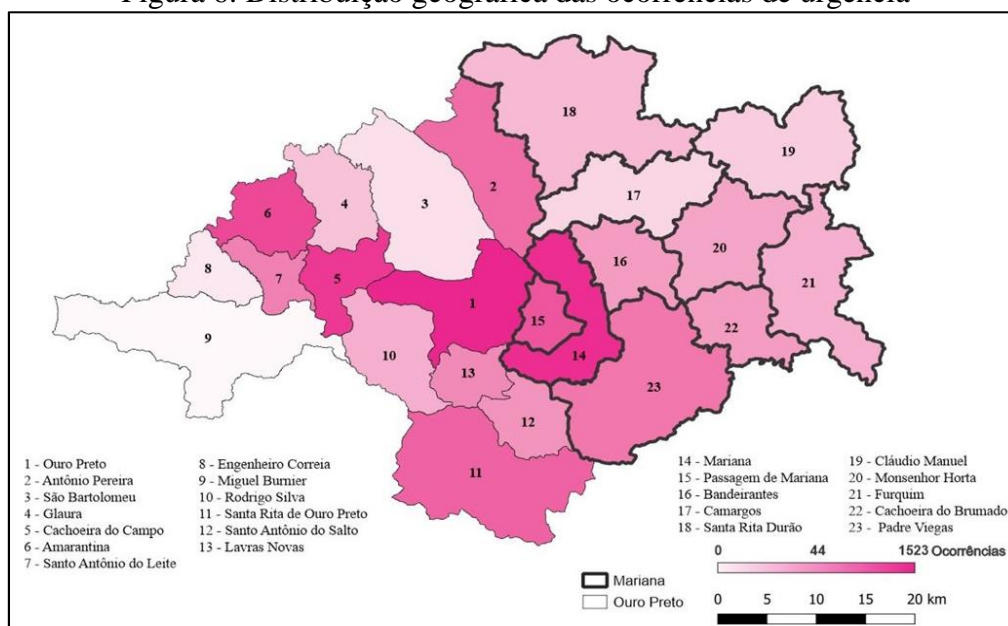
### 4.2.1 Coleta de dados

A coleta de dados foi autorizada pelas Secretarias Municipais e pelos gestores do SME objeto de estudo. Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados durante todo o ano de 2017, de 01 de janeiro a 31 de dezembro, totalizando 4.269 chamados. São oriundos dos prontuários preenchidos pelos responsáveis técnicos das ambulâncias que prestavam o atendimento de urgência. Os dados necessários à realização do estudo que estavam contidos nos prontuários eram: (i) horário de chegada da ordem de despacho; (ii) local da ocorrência; (iii) horário de chegada da ambulância ao local da ocorrência; (iv) horário de saída do local da ocorrência; (v) unidade de saúde receptora (vi) horário de chegada a unidade de saúde; (vi) horário de liberação da unidade. Outras informações que são inseridas no prontuário se referem às características do atendimento e do paciente, gênero, idade, sintomas e tipo de atendimento realizado.

No sistema estudado, o atendimento inicial e regulação médica são realizadas na Central de Regulação do município de Belo Horizonte. Diante de tal fato, os tempos decorridos entre recebimento da chamada até o despacho do veículo não foram passíveis de coleta.

A Figura 6 ilustra a distribuição das ocorrências entre os pontos de demanda. Nessa, a intensidade da cor é diretamente proporcional ao número de ocorrências originados no ponto de demanda.

Figura 6: Distribuição geográfica das ocorrências de urgência



Fonte: Desenvolvida pela autora (2021)



A Tabela 4 apresenta o número de chamados designados a cada ambulância do sistema. Na linha *Total dos chamados*, são apresentados o total de chamados coletados por ambulância. A linha *Chamados válidos* apresenta o número de chamados que possuíam as informações mínimas necessárias à análise do sistema. A linha *Percentual de chamados inválidos* representa o percentual do total de dados que não foram considerados válidos, por não apresentar informações mínimas necessárias à análise e não foram considerados na etapa de tratamento de dados. Na linha *Atendimentos realizados e Percentual de chamados atendidos*, são apresentados os números de chamados efetivamente realizados por cada ambulância e seu respectivo percentual em relação aos chamados válidos. Por fim as duas últimas linhas apresentam o número de pacientes que foram transferidos para o hospital e o percentual correspondente em relação ao número de chamados efetivamente realizados.

Verifica-se que o percentual de pacientes transferidos pela USA0009 a uma unidade de saúde é consideravelmente menor, quando comparados aos percentuais relativos às USB's. Tal fato pode ser explicado pelo significativo índice de óbitos ocorridos entre os pacientes atendidos pela equipe da USA, que apresentam, por característica, maior gravidade no estado de saúde e risco de morte.

Tabela 4 - Número de dados analisados

	USA0009	USB7555	USB7556	USB7557	Total
Total de chamados	703	1159	983	1424	4269
Chamados válidos	633	1137	954	1421	4145
Percentual de chamados inválidos	9,96%	1,89%	2,95%	0,21%	2,90%
Atendimentos realizados	606	978	767	1183	3534
Percentual chamados atendidos	95,73%	86,02%	80,40%	83,25%	25,40%
Encaminhamento para o hospital	520	922	726	1124	3265
Percentual de atendimentos encaminhados para o hospital	85,81%	94,27%	94,65%	95,01%	92,36%

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Posteriormente ao tratamento inicial dos dados, os chamados foram classificados da seguinte forma:

- a) Chamados válidos: os chamados que possuíam pelo menos o horário de chegada do chamado ou o horário de chegada da ambulância ao local de atendimento devidamente preenchidos, considerando somente um chamado em situações onde

foram atendidos mais de um paciente pela mesma equipe, no mesmo local de atendimento;

- b) Chamados com atendimento realizado: os chamados válidos onde ocorreu a alta paciente do local, encaminhamento do paciente a uma unidade de saúde ou ainda em caso de ocorrência de óbito do paciente no local.
- c) Chamados com encaminhamento para o hospital: os chamados efetivamente atendidos em que foi necessário realizar o transporte do paciente para uma unidade de saúde.

#### **4.2.2 Tratamento dos dados**

Os tempos das operações do sistema objeto de estudo foram estimados a partir dos dados coletados. Inicialmente buscou-se verificar a partir de testes estatísticos algumas hipóteses relativas ao comportamento das variáveis aleatórias desse sistema.

Os testes de hipótese são utilizados para que seja possível inferir estatisticamente, rejeitando ou não uma hipótese, que são afirmações sobre algum parâmetro de uma população.

Neste estudo, os dados foram submetidos a testes de comparação de médias: Teste t de Student (comparando a média de dois grupos de dados) ou Anova (quando a média de três ou mais grupos foram comparados). Foram então avaliados:

##### 1) Ocorrência de chamados:

Buscou-se analisar se havia diferenças significativas no número de solicitações de atendimento no sistema influenciado por aspectos temporais. Os resultados dos testes estatísticos aplicados aos dados, demonstraram com 95% de assertividade, que a ocorrência de chamados podia ser considerada homogênea entre os meses do ano e também entre os dias da semana. Entretanto, havia diferença significativa nas ocorrências de urgência ao longo do dia. Assim, os dados observados foram agrupados em três diferentes faixas horárias, sendo elas:

- Faixa 1: chamados que chegaram no sistema entre 00:00 e 07:59 horas;
- Faixa 2: chamados que chegaram no sistema entre 08:00 e 15:59 horas;
- Faixa 3: chamados que chegaram no sistema entre 16:00 e 23:59 horas.

## 2) Tempo de atendimento:

Aplicou-se testes estatísticos aos dados relativos aos tempos de atendimento com o objetivo de verificar se estes poderiam ser considerados homogêneos as unidades do tipo USB, bem como entre essas e a unidade USA. Os resultados obtidos permitem afirmar com 95% de confiança que o tempo de atendimento das três unidades do tipo USB são homogêneos. Por outro lado, o tempo de atendimento da unidade USA difere significativamente. Neste sentido, os dados observados foram agrupados em:

- Tempo de atendimento das equipes da USA;
- Tempo de atendimento das equipes da USB's;

## 3) Tempo de transferência do paciente à unidade de saúde:

Os tempos relativos à transferência do paciente para os cuidados das diferentes unidades de saúde para os quais o paciente poderia ser removido, foram também analisados a partir de testes estatísticos. Os resultados obtidos demonstraram, com uma assertividade de 95%, que há diferença significativa no tempo demandado para se transferir o paciente. Dessa forma, os dados observados foram agrupados em:

- Tempo de transferência UPA Ouro Preto;
- Tempo de transferência Hospital Santa Casa de Misericórdia;
- Tempo de transferência Policlínica de Mariana;
- Tempo de transferência Hospital Monsenhor Horta;
- Tempo de transferência Hospitais de Belo Horizonte e Região

Posteriormente, os tempos coletados foram submetidos à testes de aderência, objetivando verificar se a amostra coletada é representada por uma distribuição teórica. O teste Kolmogorov-Smirnov foi utilizado e a partir da avaliação dos dois indicadores de qualidade de ajustes, o p-valor (*p-value*) e erro quadrado (*square-error*), foram definidas as distribuições que melhor representava o conjunto de dados observados. Para esta avaliação, foi utilizada a classificação apresentada por Chwif e Medina (2015) e descrita na Tabela 5.

Tabela 5: Critérios para a classificação do *p-value*

Valor	Critério
$p\text{-value} < 0,01$	Evidência forte contra a hipótese de aderência
$0,01 \leq p\text{-value} < 0,05$	Evidência moderada contra a hipótese de aderência
$0,05 \leq p\text{-value} < 0,10$	Evidência potencial contra a hipótese de aderência
$0,10 \leq p\text{-value}$	Evidência fraca ou inexistente contra a hipótese de aderência

Chwif e Medina (2015)

Tal análise foi realizada a partir de um código desenvolvido em linguagem Python. A Tabela 6 apresenta a distribuição teórica e seu respectivo *p-value*, para cada atividade.

Tabela 6: Distribuições Teóricas de melhor ajuste aos dados

Atividade	Distribuição Teórica (Expressão)	p-value
Chegada de chamados – Faixa 1	EXPO (186,15)	0,08
Chegada de chamados – Faixa 2	EXPO (103,79)	> 0,15
Chegada de chamados – Faixa 3	EXPO (113,18)	0,09
Atendimento Auxiliar de Regulação*	24 + WEIB (97,9 ; 1,84)	> 0,15
Atendimento Médico Regulador – Tipo A*	20 + 290 * BETA (0,902 ; 2,5)	> 0,15
Atendimento Médico Regulador – Tipo B*	29 + GAMM (18,2 ; 2,06)	> 0,15
Despacho de ambulâncias*	8 + GAMM (8,56 ; 1,7)	> 0,15
Deslocamento das ambulâncias	TRIA (0,9 * tempo_viagem ; tempo_viagem ; 1,1 * tempo_viagem)	-
Tempo de atendimento – USA	WEIB (19,6 ; 1,22)	> 0,15
Tempo de atendimento – USB	ERLA (9,1 ; 2)	0,14
Tempo de transferência – UPAOP	LOGN (19,29 ; 0,43)	> 0,15
Tempo de transferência – SCMOP	TRIA (0,5 ; 10 ; 55,5)	> 0,15
Tempo de transferência – HMH (Mariana)	LOGN (18,5 ; 0,48)	0,14
Tempo de transferência – Policlínica (Mariana)	LOGN (15,17 ; 0,47)	> 0,15
Tempo de transferência – Hospitais de Belo Horizonte e região	TRIA (0,06 ; 0,15 ; 261,06)	> 0,15

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

Salienta-se aqui, duas relevantes informações:

- i. Optou-se por utilizar tempos estimados de viagem, no que se refere ao deslocamento da ambulância durante o atendimento do chamado, obtidos a partir da plataforma Google Maps. Essa opção deu-se diante da possibilidade de maior representatividade do sistema real. Para todos os tempos de deslocamento da mudança, utilizou-se o tempo médio coletado, representando a moda, 90% desse

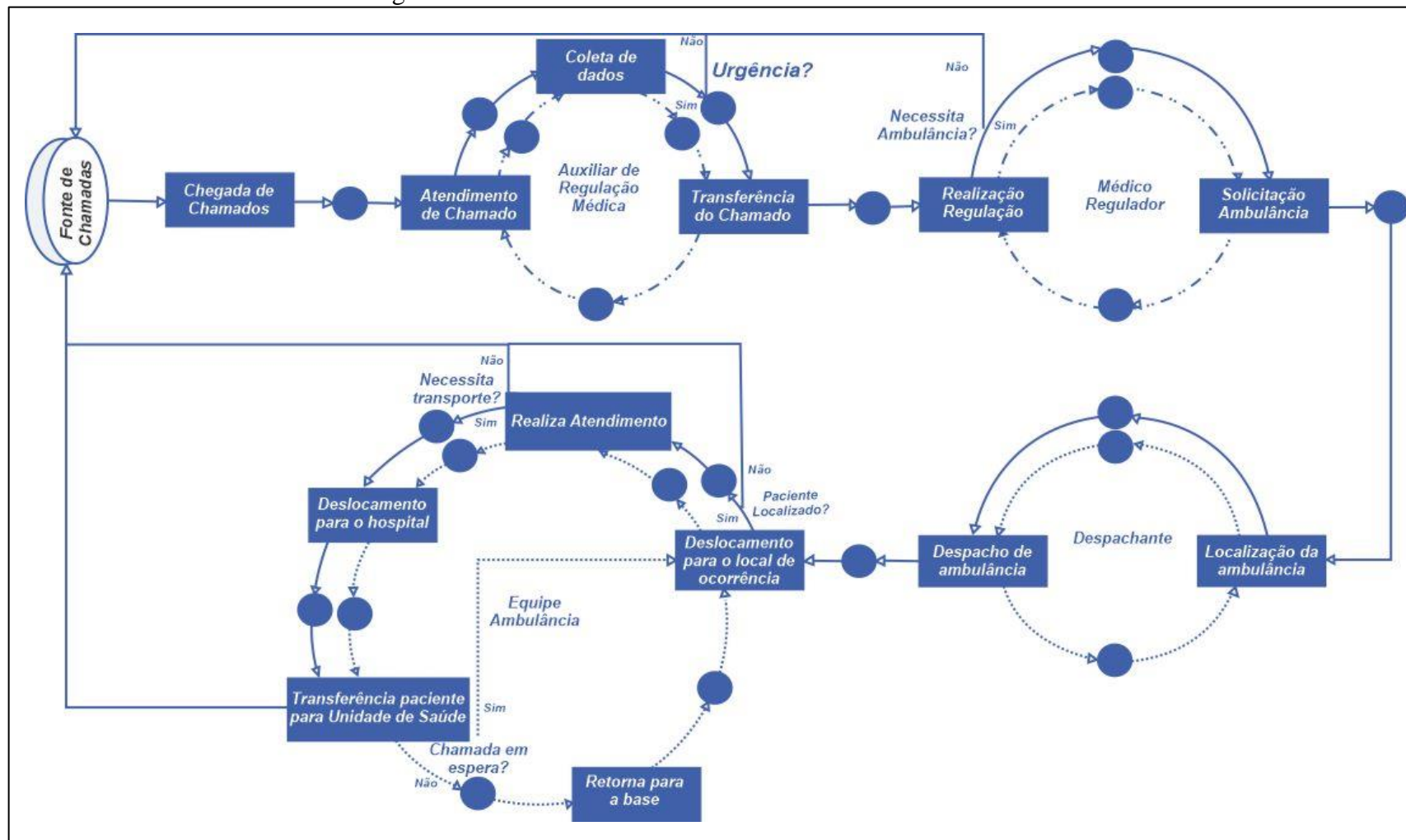
- valor (vislumbrando um momento de menor congestionamento) como o valor mínimo e 110% (para representar aqueles momentos de maior congestionamento) do mesmo valor, como o máximo, aplicados à distribuição triangular;
- ii. Conforme anteriormente informado, os dados relativos às atividades de regulação médica e despacho da ambulância não foram passíveis de coleta. Neste cenário, foram utilizados no modelo computacional desenvolvido, as distribuições descritas por Silva (2010), já que as atividades de regulação do sistema aqui estudado, ocorrem na mesma Central de Regulação do sistema estudado por este autor.

### **4.3 Criação do Modelo Conceitual**

O modelo conceitual do sistema em estudo é representado pela Figura 7. Nesta figura, os diferentes tipos de traços das linhas diferenciam cada entidade do sistema.

O modelo conceitual desenvolvido, buscou abstrair o processo de atendimento do sistema estudado. Nele é apresentada a interação da entidade dinâmica “Chamado” representada pela linha contínua com as demais entidades do sistema, tais quais realizam as atividades descritas no subtópico 3.2.

Figura 7: Modelo conceitual do SAMU de Ouro Preto e Mariana



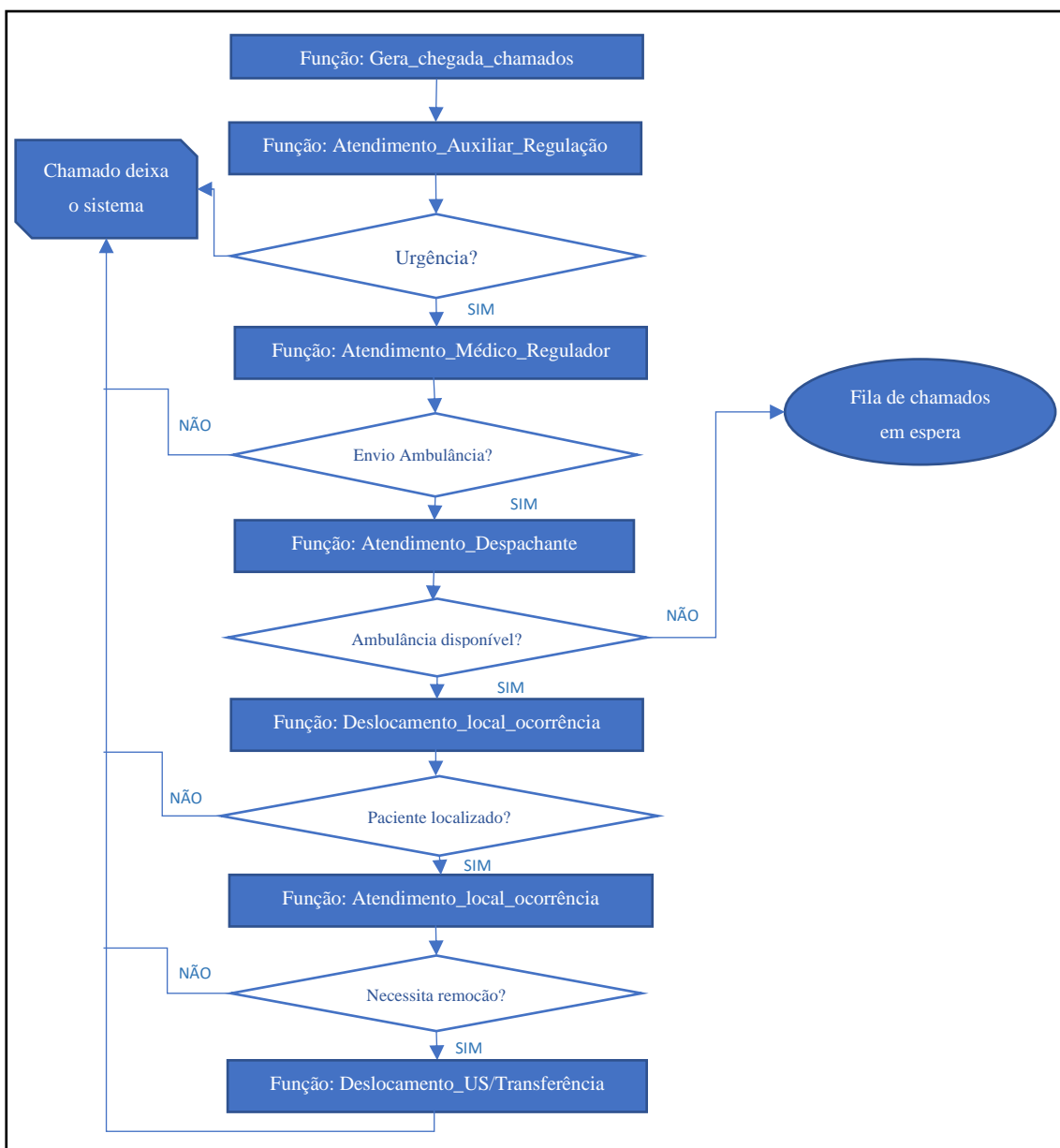
Fonte: Desenvolvido pela autora (2021)

#### 4.4 Criação do modelo computacional de simulação

O modelo computacional foi desenvolvido em linguagem Python, fazendo uso da biblioteca Simpy. Trata-se de *framework* de simulação de eventos discretos estruturado essencialmente com funções geradoras que permite modelar as interações de entidades ativas e passivas de sistemas reais.

A Figura 8 é a representação esquemática do modelo de simulação, sob perspectiva do chamado.

Figura 8: Lógica computacional – Chamado



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021)

- Função “Gera\_Chegada\_Chamados”: responsável por gerar a chegada de entidades no sistema, aqui intitulada “Chamados” em acordo com a distribuição

- teórica representativa da taxa de chegadas. Essa função é também responsável por receber os atributos do chamado, tais como: faixa horária, localização, tipo (A ou B) gerados por funções auxiliares;
- b. Função “Atendimento\_Auxiliar\_Regulação”: responsável por gerar um número aleatório representativo do tempo de ocupação do recurso “Auxiliar de regulação” e “chamar” a função que representa o atendimento do médico regulador. Vale salientar que todos os chamados foram classificados como urgência e atendidos pelo servidor. Neste estudo, considerou capacidade igual a 1 para esse recurso;
  - c. Função “Atendimento\_Medico\_Regulador”: responsável por gerar um número aleatório representativo do tempo de ocupação do recurso “Médico Regulador” e “chamar” a função que representa a atividade de despacho. Considerou-se, neste estudo, capacidade igual a 1 para esse recurso e todos os chamados que chegaram no sistema, interagiram com esse recurso;
  - d. Função “Atendimento\_Despachante”: responsável por gerar um número aleatório representativo do tempo de ocupação do recurso “Despachante”. Neste estudo, também considerou que todos os chamados foram despachados e que este recurso possuía capacidade igual a 1. Essa função é responsável por verificar se a ambulância indicada para realizar o atendimento, em acordo com a política de despacho, está disponível. Caso positivo, o servidor em questão é então requisitado e a função de deslocamento é “acionada”. Em caso de indisponibilidade, alocar o chamado em uma “fila”;
  - e. Função “Deslocamento\_local\_ocorrência”: esta função representa a atividade de deslocamento da ambulância para o local de ocorrência. Um número aleatório gerado representa o tempo de ocupação do recurso “Ambulância”. Função responsável por calcular o tempo de resposta, que é representado pela soma das atividades de regulação, despacho, espera (se for o caso) e o tempo do deslocamento;
  - f. Função “Atendimento\_local\_ocorrência”: função que verifica (em acordo com a probabilidade pré-definida) se ocorrerá o atendimento efetivo. Caso positivo, quantifica o tempo de realização a partir do número aleatório gerado. Caso negativo, retira o chamado do sistema, liberando o servidor para um novo atendimento. Ocorrendo o atendimento, a função é responsável por verificar se haverá a remoção do paciente para uma unidade de saúde (probabilisticamente). Caso ocorra a remoção, essa função “chama” a função que representa a atividade

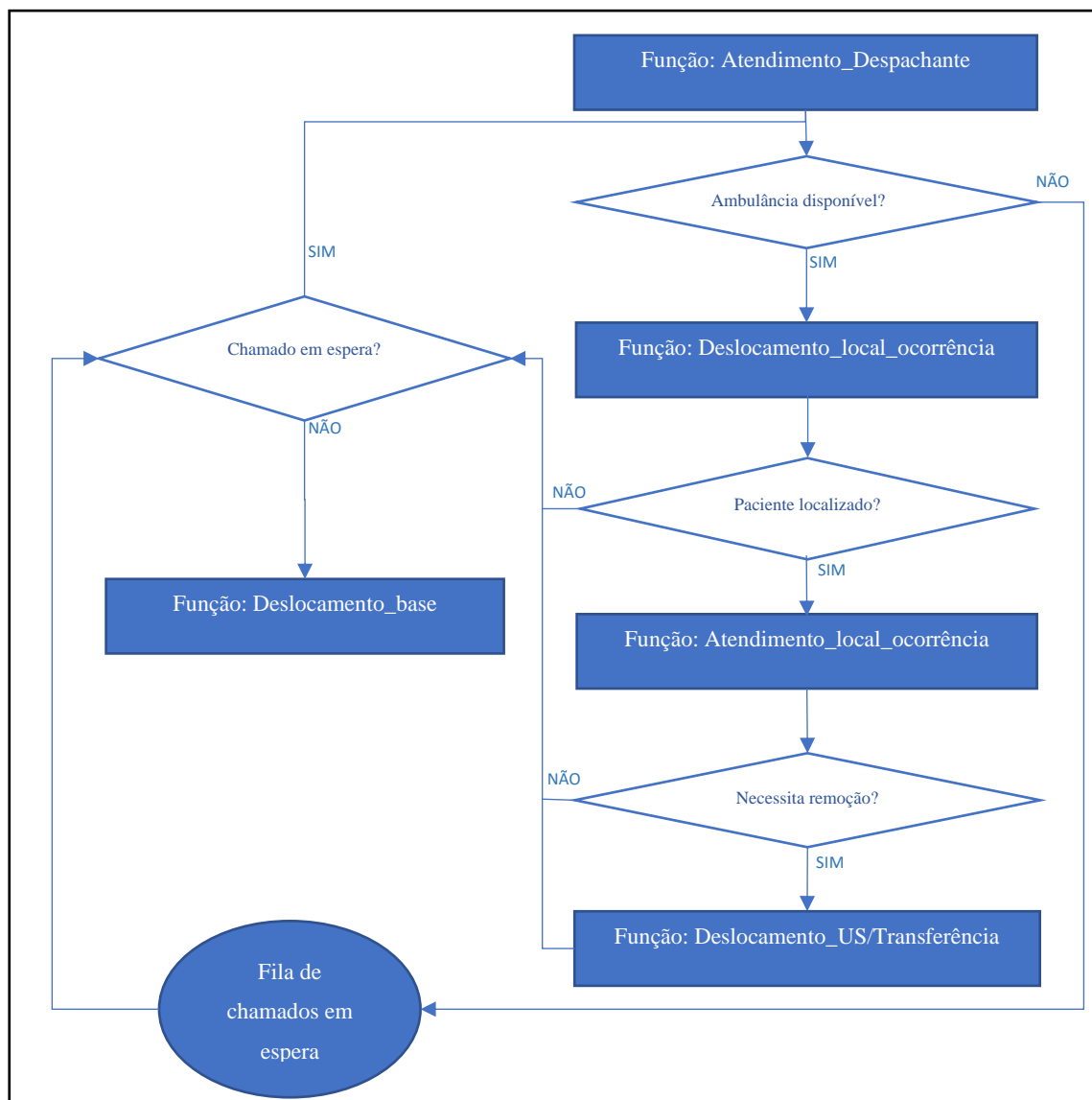


de deslocamento e transferência do paciente à unidade de saúde já definida por uma função auxiliar. No caso de não ocorrer a remoção, o chamado é retirado do sistema, tornando o servidor disponível.

- g. Função “Deslocamento US\_Transferência: função que gera o número aleatório que representa o tempo de deslocamento entre o local de ocorrência e a unidade de saúde. Nesta mesma função é gerado o número aleatório que caracteriza o tempo de transferência do paciente para a unidade receptora bem como das atividades administrativas relacionadas. Libera o servidor, tornando-o disponível para um novo atendimento.

A lógica sob a perspectiva das ambulâncias é representada na Figura 9.

Figura 9: Lógica Computacional – Ambulância



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021)

O ciclo do recurso “Ambulância” é representado pela Figura 9 e descrito a seguir:

- a. A função “Atendimento Despachante” ocupa o recurso, caso esteja disponível, acionando a função que representa o deslocamento para o local de ocorrência;
- b. A função “Deslocamento\_local\_ocorrência” atualiza a variável que contabiliza a ocupação do servidor com o valor que foi gerado aleatoriamente para representar o tempo de deslocamento entre a base e o local de origem do chamado;
- c. A função “Atendimento\_local\_ocorrência” atualiza a variável de ocupação do recurso ou o libera, caso não ocorra o efetivo atendimento ou se, após esse, não ocorrer a remoção do paciente para uma unidade de saúde. Em caso de liberação, verifica-se se há chamados aguardando em fila de espera. Caso positivo a ambulância será despachada para esse atendimento. Neste cenário, a função “Deslocamento\_local\_ocorrência” é acionada e caso contrário, a ambulância desloca-se para a sua base (local de espera) e a variável de ocupação do recurso é novamente atualizada.
- d. A função “Deslocamento\_US\_Transferência” ocupa o recurso e atualiza a sua respectiva variável de ocupação com os tempos referentes às atividades. Finalizados esses tempos, o recurso é liberado. Em seguida, verifica se há chamado em espera. Em cenário positivo, é “chamada” a função “Deslocamento\_local\_ocorrência” e em caso contrário, a ambulância desloca-se para a sua base e a variável de ocupação é atualizada.

As funções auxiliares do modelo, utilizada para se definir os atributos do atendimento foram:

- i. Sorteia\_Faixa\_Chegada: em acordo com a probabilidade de ocorrência, define a faixa horária de chegada do chamado;
- ii. Sorteia\_Átomo: definição da localização (origem) do chamado;
- iii. Sorteia\_hospital: função que define, em acordo com a probabilidade, para qual unidade de saúde o paciente será transferido;

#### 4.4.1 Verificação e validação do modelo computacional

Validar o modelo computacional consiste em verificar, a partir dos resultados obtidos, a semelhança com o sistema real estudado, apesar dos pressupostos assumidos e simplificações implementadas.

A verificação desse modelo de simulação ocorreu com a técnica modular, onde cada parte implementada tinha sua lógica de funcionamento validada (definição dos atributos do chamado, chegada de chamados, despacho da ambulância em acordo com a política utilizada, despacho da ambulância ao se tornar disponível, quando um chamado aguardava em fila) com o objetivo de identificar falhas ou erros de implementação, permitindo sua correção.

A validação deu-se a partir de comparação dos resultados obtidos das rodadas de simulação com os dados reais, além de uma análise de sensibilidade. A Tabela 7 apresenta o resultado obtidos para a variável tempo de resposta, em 10 replicações do modelo:

Tabela 7: Validação do Tempo de resposta do sistema

Replicações	Tempo de Resposta (min)
1	20,34
2	20,21
3	20,09
4	20,15
5	19,73
6	20,46
7	20,33
8	20,08
9	20,32
10	20,58
<b>Média</b>	20,23
<b>Desvio padrão</b>	0,22
<b>Real</b>	20,99

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

A média do tempo de resposta obtido a partir das 10 replicações do modelo apresentou valor 20,23 minutos com desvio padrão de 0,22 minutos. Tal valor se aproxima consideravelmente do valor médio obtido dos dados reais do sistema.

Para a análise da sensibilidade, buscou-se avaliar a variável de resposta “Taxa de ocupação” de cada ambulância do sistema. Reduziu-se em 50% o intervalo entre chegadas de chamados no sistema, e buscou-se comparar as taxas de ocupação dos servidores neste cenário (Demanda alterada) com as taxas de ocupação do cenário inalterado (Demanda atual). A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos.

Os resultados demonstraram, conforme esperado, que o aumento da demanda implica de forma direta e proporcional na taxa de ocupação das equipes das ambulâncias do sistema estudado, contribuindo também por se concluir pela validação do modelo.

Tabela 8: Validação por análise de sensibilidade da taxa de ocupação

Replicação	Taxa de ocupação							
	USA0009		USB7555		USB7556		USB7557	
	<i>Demanda Atual</i>	<i>Demanda alterada</i>	<i>Demanda Atual</i>	<i>Demanda alterada</i>	<i>Demanda Atual</i>	<i>Demanda alterada</i>	<i>Demanda Atual</i>	<i>Demanda alterada</i>
1	14%	27%	16%	36%	15%	36%	18%	31%
2	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	32%
3	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%
4	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%
5	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%
6	15%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%
7	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%
8	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%
9	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%
10	14%	27%	17%	36%	15%	37%	18%	31%

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

#### 4.4.2 Determinação dos parâmetros de execução do modelo

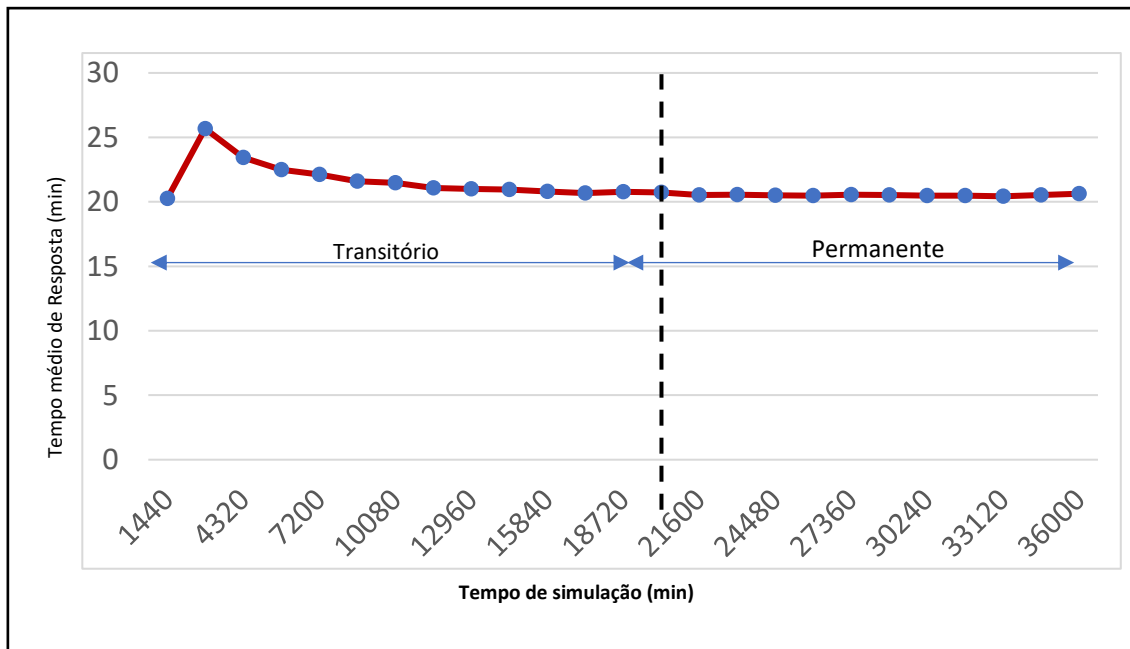
Ao se modelar um sistema e analisá-lo via simulação, faz-se necessário definir dois importantes parâmetros de execução:

- i. Tempo de aquecimento: caracterizado pelo período inicial da simulação, onde as estatísticas não são coletadas. A definição desse parâmetro é de extrema importância em análises de sistemas cuja operação ocorre em regime de processo contínuo e conseqüentemente não é possível se ter certeza de qual instante a simulação se inicia e finaliza. Em se tratando de simulação, a análise estatística do sistema estudado deve ocorrer no período no qual as variáveis de resposta não se encontram mais sob a influência do estado inicial do sistema, cuja variabilidade é menor, conhecido como regime permanente (CHWIF;MEDINA, 2015).
- ii. Número de replicações: número de vezes que o experimento de simulação é repetido para que resultados mais precisos sejam obtidos, uma vez que as entradas aleatórias do modelo geram como saída, resultados também aleatórios. É definido com uma variável de desempenho de interesse.

A definição do tempo de aquecimento para este estudo deu-se a partir de uma análise gráfica. Optou-se por avaliar, nesta análise, o tempo de resposta, por ser a métrica de desempenho de maior criticidade na avaliação de sistemas tal qual é o objeto de estudo. Para tanto, realizou-se replicações com diferentes tempos de simulação, variando entre

1440 minutos (1 dia) a 36000 minutos (25 dias). Os resultados obtidos para a variável “Tempo de resposta médio” foram plotados na Figura 10.

Figura 10: Variação do tempo de resposta pelo tempo simulado



Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

A partir da análise realizada, verificou-se que a medida de desempenho apresentou pouca variabilidade quando o tempo de simulação se aproximava de 14 dias. Sendo assim, adotou-se como tempo de aquecimento o valor de 21600 minutos ou 15 dias.

O número de replicações foi definido através da análise dos intervalos de confiança e sua respectiva precisão construídos para duas variáveis de desempenho de interesse deste estudo, o tempo de resposta médio e o tempo de espera médio.

O intervalo de confiança é uma faixa de valores que contém a média da população com certa probabilidade. Neste cenário, quanto maior a probabilidade, maior é a confiança de que esse valor está compreendido no intervalo definido. A precisão, por sua vez, se refere ao tamanho do intervalo. Quanto menor for o valor da precisão, maior inferência pode-se fazer sobre o valor da média da população (CHWIF; MEDINA, 2015).

O intervalo de confiança foi construído a partir da formulação apresentada por Chwif e Medina (2015):

$$\bar{x} \pm t_{n-1, \alpha/2} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Onde:

$\bar{x}$ : média da amostra

$t_{n-1,\alpha/2}$ : percentil da distribuição *t* de Student com  $n - 1$  graus de liberdade

$t_{n-1,\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}$ : metade do tamanho do intervalo (precisão)

$s$ : desvio padrão da amostra

$n$ : tamanho da amostra

Os valores médios para as variáveis tempo de resposta e tempo de espera foram coletados como resultado de 5 replicações do modelo. Para uma confiança de 95% e 5 replicações, o valor tabelado da estatística teste *t* é de 2,571. Os intervalos de confiança construídos e suas respectivas precisões são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9: Intervalo de confiança para as métricas de desempenho

Variável	Intervalo Confiança (min)	Precisão
Tempo de resposta médio	[19,87; 20,34]	0,235
Tempo de espera médio	[0,96; 1,02]	0,031

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Os resultados demonstraram que os intervalos são reduzidos, indicando uma boa precisão. Assim, o número de 5 replicações foi considerado adequado para ser aplicado como parâmetro na análise do sistema objeto de estudo. Em cada replicação, o período correspondente a 1 ano (525600 minutos) foi simulado.

#### 4.5 Resultados dos experimentos de simulação

Nesta subseção, serão apresentados os resultados obtidos das rodadas de simulação, em diferentes cenários.

##### 4.5.1 Configuração à época da coleta de dados x Configuração atual do sistema

Em julho de 2020, inaugurou-se no município de Ouro Preto, a Unidade de Pronto Atendimento Dom Orione (UPA), localizada no bairro Saramenha (célula 1.6). Nesta mesma época, a base da sede do município, no qual ficam alocadas duas ambulâncias do sistema, foi localizada anexo ao prédio da nova unidade de saúde.

Neste cenário, buscou-se avaliar as métricas de desempenho do sistema com a configuração aplicada à época da coleta de dados, quando ocorreu introdução da terceira base, no distrito de Cachoeira do Campo e da política de despacho regionalizada, comparando-as com a nova configuração, cuja principal mudança refere-se à nova localização da base na sede de Ouro Preto. As Tabelas 10 e 11 apresentam os resultados,

respectivamente, dos indicadores de tempo médio de resposta e dos indicadores de filas e taxa de ocupação.

Tabela 10: Indicadores de resposta – Diferentes configurações

Métricas de desempenho		Configuração antiga	Configuração atual
Tempo médio de resposta (min)	Sistema	20,12	20,10
	Urbano	14,18	15,13
	Rural	29,01	28,83
Tempos máximos (min)	Sistema	216,90	239,18
	Urbano	87,55	163,28
	Rural	216,90	239,18
Tempos mínimos (min)	Sistema	6,10	3,40
	Urbano	6,12	3,40
	Rural	6,12	6,12

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados demonstram que a alteração da localização de uma das bases pouco influenciou no tempo médio de resposta do sistema. Os tempos máximos de resposta apresentaram-se maiores para os chamados originados em áreas urbanas e rurais. Em contra partida, o tempo mínimo de resposta se apresentou reduzidos para os chamados urbanos e inalterados para os rurais

Tabela 11: Indicadores de fila e ocupação – Diferentes configurações

Métricas de desempenho		Configuração antiga	Configuração atual
Nº Médio de chamados em fila		0,62	0,60
Tempo Médio de Espera (min)		1,07	1,07
Tempo máximo de espera (min)		154,33	230,88
Taxa de ocupação da ambulância (%)	USA0009	14%	14%
	USB7555	17%	17%
	USB7556	15%	15%
	USB7557	18%	18%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados referentes à fila de espera demonstraram também pequena variação entre os cenários avaliados, salvo para o tempo máximo de espera onde, a nova configuração apresentou aumento de aproximadamente 33%. Os resultados salientam que o sistema apresenta baixo congestionamento. A ocupação dos servidores do sistema, também se apresentaram inalterados, corroborando os resultados anteriormente citados.

#### 4.5.2 Alteração da Política de Despacho

Conforme anteriormente citado, o sistema objeto de estudo aplica a política de despacho regionalizada ou “Disponível mais próxima”, em caso de indisponibilidade daquela ambulância que preferencialmente atenderia determinado chamado. Entretanto, as ambulâncias do município de Ouro Preto são despachadas para realizar atendimentos no município de Mariana, mas o contrário não procede.

Exposto isso, buscou-se verificar o comportamento do sistema, caso houvesse uma alteração na política, onde a única e principal mudança seria empenhar a ambulância de Mariana para realizar atendimentos em localidades do município vizinho.

A Tabela 12 apresenta a comparação dos resultados relativos ao tempo de resposta.

Tabela 12 : Indicadores de resposta – Políticas de Despacho

Métricas de desempenho		Configuração antiga	Configuração antiga com alteração de política	Configuração atual	Configuração atual com alteração de política
Tempo médio de resposta (min)	Sistema	20,12	19,88	20,10	19,83
	Urbano	14,18	14,30	15,13	14,93
	Rural	29,01	29,23	28,83	28,45
Tempos máximos (min)	Sistema	216,90	139,21	239,18	129,03
	Urbano	87,55	139,21	163,28	99,03
	Rural	216,90	122,83	239,18	129,03
Tempos mínimos (min)	Sistema	6,10	6,12	3,40	3,42
	Urbano	6,12	6,12	3,40	3,42
	Rural	6,12	6,13	6,12	6,12

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados demonstraram pequena redução no tempo médio de resposta do sistema. Já esse indicador para os chamados urbanos e rurais apresentaram alternância entre aumento ou redução, ainda que também, não expressivos.

A Tabela 13 apresenta os indicadores relativos aos chamados que aguardaram em fila, por indisponibilidade total de ambulâncias no sistema. Os resultados demonstram que, no cenário de alteração da política de despacho, haveria redução no tempo máximo de espera bem como no tamanho máximo da fila. O tempo máximo sofreria redução de aproximadamente 29% para a antiga política, enquanto para a atual, a redução seria de aproximadamente 66%.

Tabela 13: Indicadores de filas e ocupação – Políticas de despacho

Métricas de desempenho	Configuração antiga	Configuração antiga com alteração de política	Configuração atual	Configuração atual com alteração de política
Nº Médio de chamados em fila	0,62	0,60	0,60	0,57
Tempo Médio de Espera (min)	1,07	1,07	1,07	1,78
Tempo máximo de espera (min)	154,33	109,93	230,88	79,73
Taxa de ocupação da ambulância (%)	USA0009	14%	15%	14%
	USB7555	17%	16%	17%
	USB7556	15%	14%	15%
	USB7557	18%	19%	18%

Fonte: Resultados da pesquisa (2021)

Em relação à ocupação dos servidores, verifica-se que a alteração da política de empenho acarretaria em baixo impacto na taxa de utilização das ambulâncias.



### 4.5.3 Realocação de ambulância

Nesse cenário, buscou-se verificar se a realocação da ambulância USB7556 para as outras bases do sistema, em dada faixa horária, impactaria as métricas de desempenho do sistema. Salienta-se que todos os cenários avaliados a partir dessa subseção, levaram em consideração a configuração descentralizada do sistema, com três bases localizadas.

A Tabela 14 apresenta os tempos de resposta caso a referida ambulância fosse realocada na base da sede do município de Ouro Preto (Base 1) ou na base do município de Mariana (Base 2) nas faixas horárias, 00:00 h às 07:59h (Faixa 1), 08h às 15:59h (Faixa 2) e 16:00h às 23:59h (Faixa 3), respectivamente. A coluna “Configuração do sistema” apresenta os resultados da simulação da configuração aplicada ao sistema à época da coleta de dados.

Tabela 14: Indicadores de resposta – Realocação USB 7556

Métricas de desempenho			Realocação – Base 1			Realocação – Base 2		
		Conf. Sistema	Faixa 1	Faixa2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa2	Faixa 3
Tempo médio de resposta (min)	Sistema	20,12	20,47	20,48	20,40	21,15	21,98	21,82
	Urbano	14,18	14,62	14,80	14,72	14,87	15,33	15,12
	Rural	29,01	30,97	30,53	30,58	32,37	34,07	33,77
Tempos máximos (min)	Sistema	216,90	260,18	291,37	223,75	232,57	234,38	227,47
	Urbano	87,55	212,35	196,72	206,18	150,30	181,98	155,92
	Rural	216,90	260,18	291,37	223,75	232,57	234,38	227,47
Tempos mínimos (min)	Sistema	6,10	6,12	6,12	6,07	6,12	6,12	6,12
	Urbano	6,12	6,13	6,13	6,07	6,13	6,12	6,12
	Rural	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,12	6,13

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados demonstraram que a realocação dessa ambulância pioraria o desempenho do sistema no que tange ao tempo de resposta, já que em todos os cenários analisados, tal valor apresentou-se maior.

Tabela 15: Indicadores de fila – Realocação USB7556

Métricas de desempenho			Realocação – Base 1			Realocação – Base 2		
		Conf. Sistema	Faixa 1	Faixa2	Faixa 3	Faixa 1	Faixa 2	Faixa 3
Nº Médio de chamados em fila		0,62	0,59	0,58	0,60	0,62	0,62	0,60
Tempo Médio de Espera (min)		1,07	1,07	1,08	1,08	1,28	1,00	1,12
Tempo máximo de espera (min)		154,33	192,48	225,52	188,87	175,15	164,52	187,92
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	14%	15%	14%	15%	15%	15%	15%
	USB7555	17%	17%	17%	17%	17%	17%	17%
	USB7556	15%	15%	15%	15%	16%	17%	17%
	USB7557	18%	18%	18%	18%	18%	19%	18%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que a realocação também pouco impactaria no tempo médio de espera e tamanho da fila. De mesma forma, os indicadores de ocupação dos servidores também mostraram-se praticamente inalterados.

#### 4.5.4 Retirada de uma unidade do tipo USB

Diante do baixo congestionamento e também das baixas taxas de ocupação, optou-se por verificar o comportamento do sistema quando uma ambulância era retirada e a demanda total, absorvidas pelas demais unidades. Nos cenários avaliados, a unidade USB7556, alocada na base de Cachoeira do Campo, foi a escolhida para ser eliminada da configuração do sistema. Nestes cenários, considerou-se então o sistema com duas bases, localizada nas sedes de cada município, com duas diferentes políticas de despacho.

A Tabela 16 apresenta os resultados relativos ao tempo de resposta. A coluna “Configuração do sistema” apresenta os resultados da simulação da configuração aplicada ao sistema à época da coleta de dados. A coluna “Retira USB7556” apresenta os tempos de resposta para o cenário onde um servidor foi retirado do sistema, sem alterar a política de despacho, tal qual não prevê o empenho da unidade alocada no município de Mariana para atendimentos no município vizinho. A última coluna da tabela apresenta os resultados para um cenário de retirada de um servidor de forma simultânea à alteração da política de empenho de ambulância, considerando que todas as unidades poderiam ser empenhadas, independentemente da localização da ocorrência. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16: Indicadores de Resposta – Retirada USB7556

Métricas de desempenho		Configuração do sistema	Retira USB7556	Retira USB7556 e altera política
Tempo médio de resposta (min)	Sistema	20,12	32,75	24,72
	Urbano	14,18	17,47	15,60
	Rural	29,01	58,28	38,18
Tempos máximos (min)	Sistema	216,90	1379,00	273,77
	Urbano	87,55	602,28	177,42
	Rural	216,90	1379,00	273,77
Tempos mínimos (min)	Sistema	6,10	6,12	6,10
	Urbano	6,12	6,12	6,10
	Rural	6,12	13,32	13,33

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados dessa análise demonstram que a retirada de uma unidade acarretaria no aumento do tempo de resposta médio do sistema em 50,15% considerando a política atual de despacho e 17,84% quando a política foi alterada. Os tempos médios de resposta para os chamados oriundos das zonas rurais, sofreriam maior impacto, acarretando 47,85% e 23,88% de acréscimo, respectivamente, para a política de despacho atual e a alterada.

A Tabela 17 apresenta as métricas relativas à fila caso a ambulância USB7556 fosse retirada do sistema.

Tabela 17: Indicadores de fila – Retirada USB7556

Métricas de desempenho	Configuração do sistema	Retira USB7556	Retira USB7556 e altera política
Nº Médio de chamados em fila	0,62	0,77	0,67
Tempo Médio de Espera (min)	1,07	1,97	1,98
Tempo máximo de espera (min)	154,33	1287,57	231,18
Taxa de ocupação da ambulância (%)	USA0009	14%	13%
	USB7555	17%	32%
	USB7556	15%	-
	USB7557	18%	18%

Fonte: Resultado da Pesquisa (2021)

Os resultados dessa análise demonstraram que o número médio de chamados aguardando em fila aumentaria em 19,48%, caso a política de despacho atualmente utilizada no sistema fosse mantida e caso alterada, esse valor seria de 7,46%.

Em relação aos tempos médios de espera em fila, haveria também um aumento de aproximadamente 46% para ambos os cenários e suas respectivas políticas de empenho. Destaca-se também que mantendo-se inalterada a política de despacho, o tempo máximo de resposta aumentaria em 5 vezes. Por outro lado, alterando-se a política, haveria uma redução de aproximadamente 10%.

As taxas de ocupação das demais unidades, quando a USB7556 é retirada, são também apresentados. Verifica-se que a ambulância USB7555 ficaria 47% mais ocupada sem alteração da política de despacho. Caso a política de despacho alternativa seja aplicada, haveria acréscimo na taxa de ocupação equivalente a 37% e 31%, respectivamente, para as ambulâncias USB7555 e USB7557.

#### 4.5.5 Aumento da demanda

Ainda levando em consideração a baixa ocupação do sistema estudado, buscou-se verificar o comportamento do sistema em cenários de aumento da demanda. Avaliou-se aumentos equivalentes a 5%, 10%, 15% e 20%. A Tabela 18 apresenta os indicadores relativos ao tempo de resposta. Ao observar o tempo médio de resposta, verifica-se que os aumentos de demanda não impactaram fortemente os resultados. Entretanto, de forma contrária, os tempos máximos de respostas foram influenciados pelos aumentos de demanda apresentando-se consideravelmente maiores.

Tabela 18: Indicadores de Resposta – Aumento da demanda

Métricas de desempenho	Configuração do sistema	Aumento da demanda em 5%	Aumento da demanda em 10%	Aumento da demanda em 15%	Aumento da demanda em 20%	
Tempo médio de resposta (min)	Sistema	20,12	20,48	20,63	20,78	21,07
	Urbano	14,18	14,52	14,57	14,63	14,68
	Rural	29,01	30,97	31,10	31,30	31,75
Tempos máximos (min)	Sistema	216,90	302,87	387,65	274,88	413,32
	Urbano	87,55	150,85	177,47	223,85	195,62
	Rural	216,90	302,87	387,65	274,88	413,32
Tempos mínimos (min)	Sistema	6,10	6,18	6,10	5,97	6,03
	Urbano	6,12	6,18	6,10	5,97	6,03
	Rural	6,12	6,18	6,12	6,13'	6,12

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os indicadores de fila dessa análise são apresentados na Tabela 19. Os resultados demonstraram que essas métricas se apresentaram praticamente inalterados nos cenários de aumento de demanda, com exceção para o tempo máximo de espera, que se apresentou maior quando a demanda foi aumentada em valores superiores a 5%.

Tabela 19: Indicadores de fila – Aumento da demanda

Métricas de desempenho	Configuração do sistema	Aumento da demanda em 5%	Aumento da demanda em 10%	Aumento da demanda em 15%	Aumento da demanda em 20%	
Nº Médio de chamados em fila		0,62	0,61	0,61	0,64	
Tempo médio de espera (min)		1,07	1,08	1,28	1,32	
Tempo máximo de espera (min)		154,33	256,23	303,70	301,82	315,22
	USA0009	14%	15%	16%	17%	18%
	USB7555	17%	18%	19%	20%	21%
	USB7556	15%	16%	17%	18%	20%
Taxa de ocupação da ambulância	USB7557	18%	19%	20%	21%	22%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados dos indicadores de ocupação demonstram que a cada 5% no aumento da demanda, os servidores do sistema teriam a sua taxa de ocupação aumentada em um valor equivalente a 1%, salvo a unidade USB7556, que no cenário de aumento da demanda em 20%, apresentou um acréscimo de 2% em sua taxa de utilização.

#### 4.5.6 Retirada de 3 ambulâncias do sistema

A Portaria GM/MS nº 1864 que regulamenta o Serviço Atendimento Móvel de Urgência, tal qual é o sistema objeto de estudo, define no Art. 3º, §3º, que o número de ambulâncias do sistema deve ser definido em acordo com número de habitantes atendidos:

As ambulâncias serão adquiridas na proporção de um veículo de suporte básico à vida para cada grupo de 100.000 a 150.000 habitantes, e de um veículo de suporte avançado à vida para cada 400.000 a 450.000 por habitantes (BRASIL, 2003).

Neste sentido, como o número total de habitantes do sistema em estudo é inferior a 150.000, buscou-se verificar o comportamento do sistema, caso este fosse configurado somente com uma ambulância do tipo USB. Como neste, as populações de dois municípios são atendidas, analisou-se a alocação dessa ambulância nas bases localizadas na sede de cada município.

A Tabela 20 apresenta os resultados dos indicadores relativos aos tempos de resposta.

Tabela 20: Indicadores de resposta – Sistema com 1 ambulância

Métricas de desempenho		Configuração do sistema	Base Ouro Preto	Base Mariana
Tempo médio de resposta (horas)	Sistema	0,33	775	535
	Urbano	0,23	47,3	1,33
	Rural	0,48	807	549
Tempos máximos (horas)	Sistema	3,60	1151	1308
	Urbano	1,45	1,20	3,50
	Rural	3,60	1225	1320
Tempos mínimos (horas)	Sistema	0,10	346	132
	Urbano	0,10	0,27	0,47
	Rural	0,11	379	134

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados dos indicadores de tempo de resposta apresentaram valores proibitivos, levando-se em consideração o objetivo do sistema. Quando a ambulância foi alocada na base do município de Ouro Preto, o tempo médio de resposta do sistema foi de aproximadamente 30 dias enquanto, quando alocada em Mariana, este foi de aproximadamente 22 dias. Mesmo os tempos mínimos resultantes da análise, apresentam-se extremamente elevados.

Os resultados dos indicadores de fila e ocupação da análise dos cenários com somente uma ambulância são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Indicadores de Fila – Sistema com 1 ambulância

Métricas de desempenho	Configuração do sistema	Base Ouro Preto 1 ambulância	Base Mariana 1 ambulância
Nº Médio de chamados em fila		389	283
Tempo Médio de Espera (h)		6,67	4,30
Tempo máximo de espera (h)		2676	2618
Taxa de ocupação da ambulância	USB	18%	98%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Verifica-se que um grande número de chamados permaneceriam em fila, aguardando por atendimento, com consequentes altos tempos de espera, tais quais, também são considerados impraticáveis neste tipo de sistema. A taxa de utilização da ambulância

indica uma alta ocupação do servidor, que conforme informado anteriormente, também é impraticável em sistemas de emergência médica.

#### 4.5 Tempo médio de resposta preconizado por leis internacionais

No Brasil, não há leis que definam o tempo de resposta ideal para o tempo de resposta aos chamados de emergência. Neste cenário buscou-se avaliar quantas ambulâncias seriam necessárias para se alcançar o tempo médio de resposta preconizados pelas leis internacionais de atendimento emergencial. A Organização Mundial da Saúde indica 8 minutos como sendo o tempo de resposta ideal para os atendimentos emergenciais (NOGUEIRA JR.; PINTO; SILVA, 2014). Por outro lado, leis regedoras de SME aplicadas em países da América do Norte, indicam que 90% dos chamados urbanos devem ser atendidos em até 10 minutos enquanto para os chamados oriundos de zona rural, esse tempo deve ser de até 30 minutos (NAIR; MILLER-HOOKS, 2009)

Para se alcançar um tempo de resposta de aproximadamente 8 minutos, se fez necessário acrescentar 3 ambulâncias do tipo USA e outras 23 ambulâncias do tipo USB, totalizando 30 ambulâncias no sistema. A Tabela 22 apresenta os indicadores de tempo de resposta para este cenário analisado.

Tabela 22: Indicadores de resposta – Sistema com 30 ambulâncias

Métricas de desempenho	Configuração do sistema	Sistema com 30 ambulâncias
Tempo médio de resposta (min)	Sistema	20,12
	Urbano	14,18
	Rural	29,01
Tempos máximos (min)	Sistema	216,90
	Urbano	87,55
	Rural	216,90
Tempos mínimos (min)	Sistema	6,10
	Urbano	6,12
	Rural	6,12
Chamados urbanos atendidos em até 10 minutos		26,40%
Chamados rurais atendidos em até 30 minutos		55,83%
		77,49%
		64,75%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

As duas últimas linhas da Tabela 22, apresentam os percentuais de chamados urbanos e rurais atendidos dentro do período de tempo indicado pelas leis norte americanas. O sistema, com a configuração descentralizada, aplicada à época da coleta de dados, obtém tempo de resposta inferior a 10 minutos somente em 26,40% dos chamados oriundos de região urbana. Na configuração com 30 ambulâncias, esse percentual elevou-se para 77,49%. Em relação ao chamados rurais atendidos em até 30 minutos, na configuração

do sistema, 55,83% dos chamados de regiões rurais são atendidos em até 30 minutos. enquanto esse indicador, para a configuração com 30 ambulâncias, seria de 64,75%.

A Tabela 23 apresentam os indicadores de fila quando o sistema com 30 ambulâncias, foi analisado. Os resultados demonstraram que, neste cenário, os valores médios e máximos de tempo aguardando em fila seriam 11 segundos e 19,23 minutos, respectivamente. A taxa de ocupação das 30 ambulâncias também se apresentaria muito baixa, o que é corroborado pelo valor inferior a 1% que 13 ambulâncias apresentaram. Entretanto, a retirada de somente uma destas ambulâncias da análise, resultaria em um tempo de resposta médio superior a 9 minutos. Tal fato é justificado pela distância geográfica entre os distritos dos municípios e consequente tempo de deslocamento, quando há a ocorrência de um chamado em um distrito que não possua uma base localizada.

Tabela 23: Indicadores de Fila – Sistema com 30 ambulâncias

Métricas de desempenho	Configuração do sistema	Sistema com 30 ambulâncias
<b>Nº Médio de chamados em fila</b>	0,62	0,1
<b>Tempo Médio de Espera</b>	1,06	0,18
<b>Tempo máximo de espera</b>	256,48	19,23
	USA0009	14%
	USB7555	17%
	USB7556	15%
	USB7557	18%
	USAADC1	-
	USAADC2	-
	USAADC3	-
	USBADC1	-
	USBADC2	-
	USBADC3	-
	USBADC4	-
	USBADC5	-
	USBADC6	-
	USBADC7	-
<b>Taxa de ocupação da ambulância</b>	USBADC8	-
	USBADC9	-
	USBADC10	-
	USBADC11	-
	USBADC12	-
	USBADC13	-
	USBADC14	-
	USBADC15	-
	USBADC16	-
	USBADC17	-
	USBADC18	-
	USBADC19	-
	USBADC20	-
	USBADC21	-
	USBADC22	-
	USBADC23	-

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

#### **4.6 Discussões dos resultados**

A partir do modelo computacional desenvolvido, foi possível avaliar cenários alternativos para o sistema objeto de estudo.

Conforme anteriormente citado, o sistema estudado encontra-se atualmente, com uma nova configuração quando comparada com a configuração aplicada no momento da coleta de dados. Os resultados da análise comparativa das configurações, demonstraram que as métricas de desempenho do sistema não foram impactadas pela mudança ocorrida.

Ao analisar a alteração da política de despacho, onde as ambulâncias de ambos os municípios poderiam ser empenhadas para realizar atendimento no município vizinho, desde que sendo a mais próxima disponível, verificou-se a partir dos resultados que o tempo de resposta médio seria reduzido, mesmo que em valores inferiores a 1 minuto. Entretanto, sugere-se que um estudo que leve em consideração os custos envolvidos bem como a maior taxa de ocupação das equipes, seja desenvolvido e considerado no processo de tomada de decisão.

Em relação à possibilidade de se realocar uma ambulância em outra base, nas diferentes faixas horárias do dia, verificou-se a partir dos resultados, uma piora nas métricas de desempenho do sistema. Neste sentido, a ação de realocação de equipes, não é recomendada.

Diante da baixa taxa de ocupação das equipes do sistema estudado, buscou-se avaliar o comportamento do sistema em caso de redução de uma ambulância. Os resultados demonstraram um aumento expressivo de aproximadamente 50% do tempo de resposta médio. Entretanto, caso essa alteração seja aplicada de forma conjunta com a alteração da política de despacho, empenhadas ambulâncias para atendimentos, independentemente de seu município de localização, o aumento do tempo de resposta médio seria consideravelmente menor.

Para cenários de aumento da demanda, verificou-se a partir dos resultados, que o sistema seria capaz de absorver um aumento de até 20% sem impactar fortemente seu desempenho, visto que o tempo de resposta médio seria acrescido de um valor inferior a 1 minuto. Salienta-se que o tempo de resposta médio atualmente praticado já é bastante superior àqueles preconizados pelas leis internacionais que orientam os serviços de urgência. Porém, ao se avaliar o número de ambulâncias necessárias para se alcançar o



tempo médio de resposta preconizado pela OMS, verificou-se ser necessário o número mínimo de 30 ambulâncias.

## 5 OTIMIZAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

Com o objetivo de avaliar cenários que demandavam um grande conjunto de variáveis de entradas diferentes, integrou-se ao modelo de simulação, uma estrutura de otimização baseada na meta-heurística *Simulated Annealing*. A estrutura proposta objetiva avaliar diferentes localizações de bases e alocações de ambulâncias, a partir do valor da função objetivo do problema estudado, sendo este, o tempo de resposta médio do sistema.

A Figura 11 apresenta o pseudocódigo dessa estrutura.

Figura 11: Pseudocódigo da estrutura de Otimização da Simulação proposta

```

algoritmo SA_Simul( $T_0, T_f, Sa_{max}, \alpha$ )
1  Gere uma solução inicial  $s$ 
2   $s^* \leftarrow s$ 
3   $f(s) \leftarrow tr(s)$ 
4   $f(s^*) \leftarrow tr(s)$ 
5   $Iter\_t \leftarrow 0$ 
6   $T \leftarrow T_0$ 
7  enquanto  $T \geq T_f$  faça
8    enquanto  $Iter\_t < Sa_{max}$  faça
9      gere um vizinho  $s'$  aleatoriamente ( $s' \in N(s)$ )
10     execute 5 replicações de simulação para  $s'$  e calcule  $tr$ 
11      $f(s') \leftarrow tr(s')$ 
12     calcule  $\Delta = f(s') - f(s)$ 
13     se ( $\Delta \leq 0$ ) então
14        $s \leftarrow s'$ 
15       se  $f(s') < f(s^*)$  então
16          $s^* \leftarrow s'$ 
17          $Iter\_t \leftarrow 0$ 
18     senão
19        $s \leftarrow s'$  com probabilidade  $e^{-\Delta/T}$ 
20        $Iter\_t \leftarrow Iter\_t + 1$ 
21     fim-enquanto
22      $T \leftarrow \alpha \times T$ 
23      $Iter\_t \leftarrow 0$ 
24   fim-enquanto
25   retorne  $s^*$ 
fim-algoritmo

```

Fonte: Desenvolvido pela autora (2021)

O algoritmo recebe quatro parâmetros de controle além do conjunto de estruturas de vizinhança. O Quadro 2 apresenta a descrição dos parâmetros utilizados pelo modelo.

Quadro 2: Parâmetros de entrada do algoritmo SA\_Simul

Parâmetro	Descrição
$T_0$	Temperatura Inicial
$T_f$	Temperatura Final – esse parâmetro é o critério de parada do método
$SA_{max}$	Número de iterações sem melhora na melhor solução encontrada (s)
$\alpha$	Taxa de resfriamento da temperatura

Fonte: Dados da pesquisa (2021)

O algoritmo SA\_Simul funciona da seguinte forma: O funcionamento do algoritmo SA\_Simul é descrito a seguir:

- 1) Inicialmente o método recebe uma solução inicial, gerada aleatoriamente, e uma rodada de simulação define o valor da função de avaliação. Essa solução será, no início do método, simultaneamente, a melhor solução encontrada (s) e também a solução corrente;
- 2) Para cada temperatura, enquanto o número de iterações é inferior ao valor de  $SA_{max}$ , o método recebe uma solução vizinha ( $s'$ ), com base na estrutura de vizinhança selecionada;
- 3) Para cada solução vizinha, são geradas as variáveis de entrada do modelo de simulação, tal qual retorna com o valor da função de avaliação, que nesta estrutura, refere-se ao tempo de resposta médio  $tr(s)$ , a partir de cinco replicações;
- 4) O valor de saída da simulação é utilizado para o cálculo de delta. Caso este valor seja negativo, a solução vizinha torna-se a solução corrente e verifica-se se esse valor é menor que o valor da melhor solução encontrada ( $s^*$ ). Caso positivo, esta torna-se a melhor solução encontrada e a variável de controle do número de iterações recebe o valor 0;
- 5) Caso o valor de delta seja positivo, avalia-se a probabilidade da solução vizinha ( $s'$ ) ser aceita como solução corrente (s). Neste cenário, a variável de controle do número de iterações é incrementada em uma unidade.
- 6) Quando o valor de  $Iter\_t$  torna-se maior que o valor de  $SA_{max}$ , a variável de controle da temperatura (T) é atualizada, recebendo um novo valor, mais baixo. Quando esta atinge o valor do critério de parada ( $T_f$ ), o método é encerrado, retornando a melhor solução encontrada ( $s^*$ ).

## 5.1 Solução do problema

A solução retornada pelo modelo proposto é representada por dois vetores. Em *Python*, este tipo de objeto é chamado de lista e os valores que o compõe a lista, são chamados de elementos ou itens. A primeira lista representa a localização das bases enquanto a segunda, apresenta a respectiva alocação de ambulâncias. A Figura 12 ilustra uma solução da estrutura aqui proposta.

Figura 12: Exemplo de solução retornada pelo método SA\_Simul

`[7, 16, 20], [['USA01', 'USB02'], ['USB01'], ['USB03']]`

Fonte: Desenvolvida pela autora (2021)

A interpretação da solução apresentada na Figura 12 é:

- a. Localização: O sistema deve instalar três bases, nas localizações cujos códigos de identificação são 7, 16 e 20;
- b. Na base instalada na localização 7, devem ser alocadas duas ambulâncias, uma do tipo USA e outra do tipo USB;
- c. Na segunda base, instalada na localização 16, uma ambulância do tipo USB deve ser alocada;
- d. Na terceira base, instalada na localização 20, mais uma ambulância do tipo USB deve ser alocada.

### 5.1.1 Solução Inicial

Os modelos de localização são aplicados em problemas onde unidades de serviços, também chamadas de facilidades, serão instaladas para atender as demandas de forma a otimizar algum critério, como minimizar a distância total percorrida, por exemplo.

Neste estudo, o modelo da P-Mediana foi aplicado para se alcançar o objetivo supramencionado. Este modelo apresenta-se como o mais popular dentre aqueles associados aos problemas de localização. Objetiva minimizar a soma ponderada das distâncias das demandas às instalações disponíveis, sendo bastante apropriado a sua utilização, neste estudo. A formulação proposta por Hakimi (1964) é apresentada a seguir:

$$\text{Minimizar} \quad \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} w_i d_{ij} x_{ij} \quad (3)$$

$$\text{s. a} \quad \sum_{j \in N} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

$$\sum_{j \in N} x_{jj} = p \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj}, \quad \forall i \in N, j \in N \quad (6)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \quad \forall i \in N, j \in N \quad (7)$$

Sendo:

$N$  o conjunto de pontos de demanda;

$i \in N$  determinado cliente ou vértice;

$p$  o número de instalações de serviço ou medianas a serem localizadas;

$w_i$  o peso ou importância do cliente  $i$ ;

$[d_{ij}]_{n \times m}$  a matriz simétrica de distâncias de cada cliente  $i$  à instalação  $j$  com  $d_{jj} = 0, \forall i, j \in N$

$[x_{ij}]_{n \times m}$  a matriz de alocação de cada cliente  $i$ , onde  $x_{ij} = 1$ , se o cliente  $i$  é alocado à instalação  $j$ ,  $x_{ij} = 0$ , caso contrário;

$x_{jj} = 1$  indica que  $j$  é uma mediana e  $x_{jj} = 0$  em caso contrário.

A função objetivo (3) indica a minimização das distâncias ponderadas entre clientes e facilidades. O conjunto de restrições (4) garante que cada cliente  $i$  seja alocado a somente uma instalação  $j$ . As restrições (5) garantem que somente  $p$  facilidades sejam instaladas. As restrições (6) garantem que o cliente somente é atendido por uma facilidade instalada. As restrições (7) definem o domínio das variáveis.

O sistema objeto de estudo possui, em acordo com a divisão em microrregiões, trinta e cinco pontos de demandas. Optou-se por inicialmente fazer uso de um modelo matemático de localização, com o objetivo de se definir dez localizações, dentre os pontos de demanda, que se apresentasse como locais candidatos.

No Quadro 3 são descritos os pontos de demandas do sistema estudado e seu respectivo número de identificação, na solução do problema.

Quadro 3: Identificação dos pontos de demanda na solução do problema

Código de identificação	Microrregião
1	Base Ouro Preto
2	Base Mariana
3	Base Cachoeira do Campo
4	Passa Dez de Baixo, Jacuba, São Cristóvão, UPA, Lages, Cabeças
5	Nossa Senhora de Lourdes, Vila São Jose, Água Limpa, Nossa Senhora do Rosário, Jardim Alvorada

6	Nossa Senhora do Pilar, Centro, Antônio Dias
7	Barra, Vila Aparecida, Lagoa, Morro do Cruzeiro
8	Pocinho, Vila Itacolomy, Hospital Santa Casa, Nossa Senhora do Carmo, Novo Horizonte
9	Vila dos Engenheiros, Vila dos Operários, Saramenha, Tavares, Barcelos
10	Nossa Senhora das Dores, Padre Faria, Santa Cruz
11	Alto da Cruz, Taquaral, Nossa Senhora da Piedade
12	Morro São Sebastiao, Morro São João, Morro da Queimada, Morro Santana, Caminho da Fábrica
13	Amarantina
14	Cachoeira do Campo
15	Glaura
16	Engenheiro Corrêa
17	São Bartolomeu
18	Santo Antônio do Leite
19	Lavras Novas
20	Rodrigo Silva
21	Santo Antônio do Salto
22	Santa Rita de Ouro Preto
23	São Cristóvão, Vila Maquiné, Jardim dos Inconfidentes, Vila Aparecida, Morada do Sol
24	Cabanas, Santa Rita de Cássia, Santa Clara
25	Estrela do Sul, Nossa senhora Aparecida, São Sebastião
26	Barro Preto (base), Fonte da Saudade, Rosário, Marília de Dirceu, Galego, Santana, Cruzeiro do Sul
27	Santo Antônio, São Gonçalo, Centro, Vila do Carmo, São Pedro
28	São José , Vale Verde, Cartucha, São Vicente
29	Passagem de Mariana, Liberdade, Vila São Vicente
30	Antônio Pereira
31	Bandeirantes
32	Camargos
33	Santa Rita Durão
34	Cachoeira do Brumado
35	Cláudio Manuel
36	Furquim
37	Monsenhor Horta
38	Padre Viegas

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

O modelo foi implementado em linguagem AMPL e solucionado através do *solver* CPLEX 12.1.1, em um computador Intel Core I5 1.8 GHz e 16 Gb de memória RAM.

Como resultado da execução do modelo matemático, foram definidas as 10 localizações candidatas para a instalação das bases, que são elas: 4, 8, 11, 13, 14, 19, 22, 24, 26, 27.

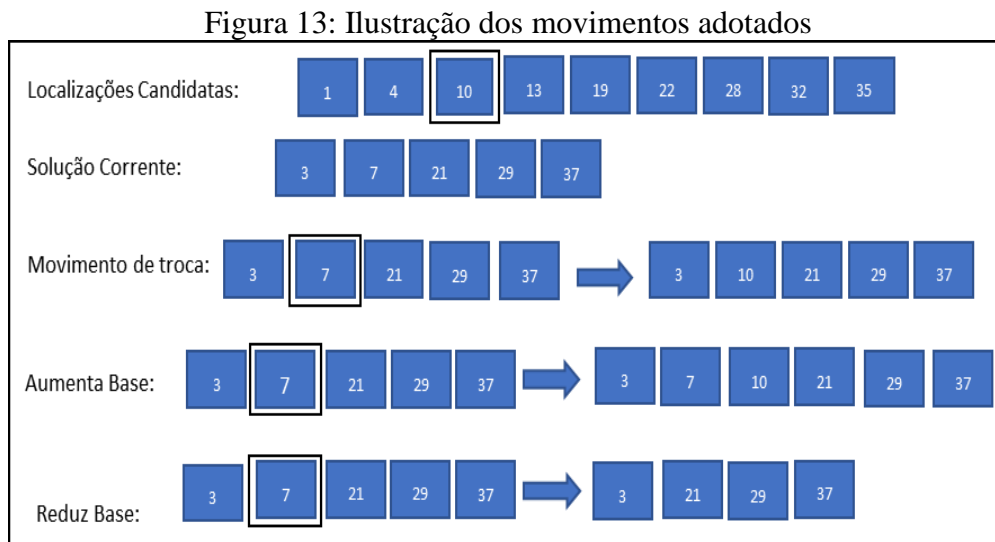
A solução inicial foi definida a partir de um método de escolha aleatório. Sendo assim, de acordo com o número de bases passíveis de localização, a estrutura de geração de solução escolhia aleatoriamente uma, dentre as localidades candidatas disponíveis e após, alocava em cada uma, todas as ambulâncias disponíveis no cenário avaliado, também de forma aleatória.

## 5.2 Estruturas de vizinhança

As estruturas de vizinhanças utilizadas no modelo consistem em movimentos que objetivam alterar a localização das bases e foram descritas como:

- i. Troca: a estrutura realiza a troca de  $n$  localizações dentre as candidatas, onde  $n$  é determinado de forma aleatória e varia entre 1 e  $m-1$ , sendo  $m$ , o número de bases da solução corrente. As localizações retiradas, bem como inseridas à solução corrente, são selecionadas aleatoriamente;
- ii. Aumenta número de bases: a estrutura insere  $n$  localizações à solução corrente, onde  $n$  é determinado de forma aleatória e varia entre 1 e  $p-m$ , sendo  $p$  o número máximo de bases a localizar e  $m$ , o número de bases da solução corrente, com  $p \geq m$ . As novas localizações inseridas à solução corrente, são selecionadas aleatoriamente;
- iii. Reduz número de bases: a estrutura retira  $n$  localizações da solução corrente, onde  $n$  é determinado de forma aleatória e varia entre 1 e  $m-p$ , sendo  $m$  o número de bases da solução corrente e  $p$  o número mínimo de bases a localizar. As localizações retiradas da solução corrente são selecionadas aleatoriamente.

A Figura 13 ilustra movimentos aplicados em cada de estrutura de vizinhança adotadas no modelo de otimização da simulação.



Fonte: Desenvolvido pela autora (2021)

Na Figura 13, sendo a lista de candidatas composta pelas localizações ainda não inseridas na solução corrente, [1,4,10,13,19,22,28,32,35] e sendo a solução corrente [3,7,21,29,37], considerando que aleatoriamente se selecionou a localização 10 na lista de candidatas para compor o movimento adotado e na solução corrente, a localização 7:

- i. No movimento Troca, a localização 10 substituirá a localização 7, gerando uma solução vizinha, cujo número de bases da solução será igual à da solução corrente;

- ii. No movimento Aumenta Base, a localização 10 será inserida na solução, gerando-se uma solução vizinha, cujo número de bases será maior que da solução corrente;
- iii. No movimento Reduz Base, a localização 7 será retirada, gerando-se uma solução vizinha, cujo número de bases será menor que da solução corrente.

Após gerada a solução vizinha, as ambulâncias são sorteadas aleatoriamente e inseridas em determinada posição de uma lista de vetores, cujo tamanho equivale ao tamanho da solução corrente, também determinada de forma aleatória. Associa-se a alocação das ambulâncias à base, a partir dos índices da lista, ou seja, da posição que ocupam na lista, conforme apresentado na Figura 12.

### 5.3 Parâmetros de controle do modelo

Os parâmetros do modelo de otimização da simulação foram estimados a partir de experimentos. O Quadro 4 apresenta os parâmetros que foram testados.

Os parâmetros de controle do modelo de otimização da simulação foram estimados a partir de experimentos. O Quadro 4 apresenta os parâmetros que foram combinados entre si, gerando 36 conjuntos que foram aplicados no modelo desenvolvido e analisados sob a perspectiva da qualidade da solução encontrada e também, eficiência computacional.

Quadro 4: Parâmetros do modelo de otimização da simulação

Parâmetros	Valores		
Temperatura Inicial ( $T_i$ )	150	100	50
Temperatura Final ( $T_f$ )	0,01	0,001	
Taxa de resfriamento ( $\alpha$ )	0,95	0,98	
Número máximo de iterações sem melhora (SA_MAX)	50	75	100

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Os valores apresentados no Quadro 4 foram combinados entre si, gerando 36 conjuntos que foram aplicados no modelo desenvolvido e analisados sob a perspectiva da qualidade da solução encontrada e também, eficiência computacional.

O Quadro 5 apresenta o conjunto de parâmetros que apresentou os melhores resultados e foi, portanto, utilizado nas execuções do modelo.



Quadro 5: Parâmetros do modelo de otimização da simulação

Parâmetro	Valor
Temperatura Inicial ( $T_i$ )	150
Temperatura Final ( $T_f$ )	0,01
Taxa de resfriamento ( $\alpha$ )	0,95
Número máximo de iterações sem melhora (SA_MAX)	50

Fonte: Dados da Pesquisa (2021)

Para cada iteração, foi adotado o número de 5 replicações da simulação, cujo tempo simulado, era equivalente a um ano ou 525.600 minutos. O valor da função de avaliação, retornado pelo modelo de simulação, se refere ao tempo de resposta médio do sistema.

#### 5.4 Resultados dos experimentos de Otimização da Simulação

Nesta subseção, serão apresentados os resultados das análises realizadas no modelo de otimização da simulação. Tratam-se de cenários avaliados anteriormente por simulação com o objetivo de verificar a existência de uma configuração alternativa, que apresentasse um tempo de resposta reduzido.

##### 5.4.1 Localização e alocação estratégica de bases e ambulâncias

A configuração do sistema objeto de estudo conta, conforme anteriormente informado, com 3 bases descentralizadas. Neste cenário, buscou-se verificar se existia uma localização de bases e alocação das ambulâncias que resultava em um tempo médio de resposta menor que 20 minutos e 07 segundos, tal qual é o tempo praticado pelo sistema estudado. A Tabela 24 apresenta os resultados dessa análise.

Os resultados obtidos através da estrutura de otimização da simulação demonstraram que existe uma configuração alternativa, que reduz o tempo de resposta médio em 1 minuto e 59 segundos, o que representa uma redução de aproximadamente 10%. Essa redução foi resultante de uma diminuição do tempo de resposta médio aos chamados oriundos de regiões urbanas, que se apresentou 1 minuto e 25 segundos menor quando comparado a com o valor apresentado pelo sistema, com sua configuração original. Por outro lado, esse mesmo indicador para os chamados que tiveram origem em regiões rurais, sofreu um acréscimo de 40 segundos, correspondendo a 1,36% de seu valor.

Tabela 24: Localização estratégica das bases com tempo de reposta minimizado

Descrição	Configuração atual	Melhor solução encontrada	
Localização	[4, 14, 26]	[4, 8, 14, 27]	
Alocação das ambulâncias	[['USA0009','USB7555'], ['USB7556'], ['USB7557']]	[['USB7555'], ['USA0009'], ['USB7556'], ['USB7557']]	
Tempo de resposta médio (min)	Sistema	20,12	18,13
	Urbano	14,18	12,60
	Rural	29,01	29,68
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos	26,40%	13,05%	
% chamados rurais atendidos em até 30 minutos	55,83%	40,48%	
Nº Médio de chamados em fila	0,62	0,99	
Tempo médio de espera	1,06	1,00	
Tempo máximo de espera	256,48	360,94	
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	14%	12%
	USB7555	17%	19%
	USB7556	15%	16%
	USB7557	18%	23%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Os resultados demonstraram também, que a nova localização, apesar de apresentar menor tempo de resposta médio, seria capaz de atender um menor percentual de chamados em acordo com o tempo máximo indicado pelas leis norte-americanas. Em relação ao percentual de chamados com origem em regiões urbanas, a nova localização apresentaria uma redução de 50,57% em sua capacidade de atender chamados em até 10 minutos. Já, para os atendimentos oriundos de zonas rurais atendidos em até 30 minutos, essa redução seria de 27,49%.

Em relação aos indicadores de fila, verificou-se, a partir dos resultados, que o número de chamados aguardando em fila, sofreria um acréscimo de aproximadamente 37%. Entretanto, esse número médio seria ainda inferior a 1 chamado. O tempo máximo de espera apresenta-se maior em aproximadamente 29%.

A taxa de ocupação das equipes das unidades do tipo USB também se apresentou aumentada em 2%, 1% e 5%, respectivamente, para as unidades USB7555, USB7556 e USB7557. De forma contrária, a taxa de ocupação da unidade USA0009 decresceu em 2%.

### 5.4.2 Localização estratégica em cenários de aumento da demanda

No capítulo 4 foram apresentados os resultados da análise do comportamento do sistema em cenários de aumento de demanda. Aqui, objetiva-se verificar a existência de uma configuração estratégica capaz de reduzir o tempo de resposta médio apresentado pela análise anterior. Assim, foram avaliados cenários de aumento da demanda em 5%, 10%, 15% e 20% e comparados com os resultados obtidos através da simulação do sistema, com a configuração aplicada ao sistema no momento da coleta de dados.

Na Tabela 25, verifica-se os resultados apresentados pelo modelo de otimização da simulação para o cenário de aumento da demanda em 5%.

Tabela 25: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 5%

Descrição		Configuração atual	Melhor solução encontrada
Localização		[4, 14, 26]	[4,11,14,27]
Alocação das ambulâncias		['USA0009','USB7555'], ['USB7556'], ['USB7557']	['USB7555'], ['USA0009'], ['USB7556'], ['USB7557']
Tempo de resposta médio (min)	Sistema	20,48	18,28
	Urbano	14,52	12,97
	Rural	30,97	27,73
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos		26,56%	26,40%
% chamados rurais atendidos em até 30 minutos		55,13%	55,83%
Nº Médio de chamados em fila		0,62	1,31
Tempo médio de espera		1,08	9,77
Tempo máximo de espera		256,23	797,32
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	15%	11%
	USB7555	18%	21%
	USB7556	16%	16%
	USB7557	19%	19%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

A estrutura apresentou uma localização de base alternativa, que minimizaria o tempo de resposta em 2 minutos e 20 segundos ou 10,74%. Nessa configuração, a USA deveria ser alocada em uma base localizada na célula 11 do município de Ouro Preto enquanto a USB7557 deveria ser alocada em uma base situada na célula 27, região central de Mariana. Com esta nova configuração, os tempos de resposta médio aos chamados ditos urbanos e rurais, também seriam reduzidos em 10,67% e 10,46%, respectivamente. Os percentuais de chamados urbanos e rurais atendidos dentro da métrica indicada pelas leis internacionais se manteriam inalterados.

Em relação aos indicadores de fila, observa-se que o número médio de chamados, assim como o tempo médio aguardando em fila se apresentaram aumentados, porém, em valores aceitáveis. Verifica-se ainda, que a taxa de ocupação das ambulâncias alocadas na sede de Ouro Preto, sofreria alterações, como decréscimo de utilização em 4% para a unidade USA0009 e acréscimo de 3% na utilização da unidade USB7555.

Os resultados obtidos para a análise do aumento da demanda em 10%, são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 10%

Descrição	Configuração atual	Melhor solução encontrada	
Localização	[4, 14, 26]	[11,14,27]	
Alocação das ambulâncias	['USA0009','USB7555'], ['USB7556'], ['USB7557']	['USB7555','USA0009'], ['USB7556'], ['USB7557']	
Tempo de resposta médio (min)	Sistema	20,63	18,73
	Urbano	14,57	12,45
	Rural	31,10	28,88
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos	26,59%	26,56%	
% chamados rurais atendidos em até 30 minutos	54,95%	55,13%	
Nº Médio de chamados em fila	0,61	1,31	
Tempo Médio de Espera	1,28	9,93	
Tempo máximo de espera	303,70	739,03	
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	16%	15%
	USB7555	19%	24%
	USB7556	17%	18%
	USB7557	20%	26%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

O modelo apresentou uma solução com 3 bases localizadas, onde o tempo de resposta seria reduzido em 2 minutos e 14 segundos, que corresponde a uma redução de 10,51% de seu valor. Nesta solução, a base da sede do município de Ouro Preto deveria ser localizada na célula 11 e as ambulâncias USA0009 e USB7555 alocadas nessa base. De mesma forma, a ambulância USB7557, do município de Mariana, deveria ser alocada em uma base localizada na célula 27. Os tempos de resposta médio para os chamados originados em zonas urbanas e rurais seriam reduzidos em 14,43% e 8,15%, respectivamente. De forma semelhante aos cenários anteriormente avaliados, o percentual dos chamados atendidos no tempo limite preconizado pelos órgãos internacionais de saúde, sofreriam expressiva queda.

Os indicadores de fila, na melhor solução encontrada, apresentaram-se com comportamento semelhante ao do cenário com a demanda aumentada em 5%. Em relação aos indicadores de ocupação, destaca-se o aumento da taxa de utilização das ambulâncias USB7555 e USB 7557, aumentadas em 5% e 6%, respectivamente, com esta nova configuração.

Os resultados obtidos para um cenário de aumento de demanda em 15% são apresentados na Tabela 27.

**Tabela 27: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 15%**

Descrição	Configuração atual	Melhor solução encontrada	
Localização	[4, 14, 26]	[11,14,27]	
Alocação das ambulâncias	[[‘USA0009’,‘USB7555’], [‘USB7556’], [‘USB7557’]]	[[‘USB7555’,‘USA0009’], [‘USB7556’], [‘USB7557’]]	
Tempo de resposta médio (min)	Sistema	20,78	18,73
	Urbano	14,63	12,44
	Rural	31,30	29,46
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos	26,43%	13,05%	
% chamados rurais atendidos em até 10 minutos	54,67%	39,58%	
<hr/>			
Nº Médio de chamados em fila	0,61	1,12	
Tempo Médio de Espera	1,32	9,57	
Tempo máximo de espera	301,82	146,06	
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	17%	14%
	USB7555	20%	21%
	USB7556	18%	18%
	USB7557	21%	22%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

O modelo apresentou uma solução onde o tempo de resposta médio do sistema seria 1 minutos e 58 segundos menor, com a mesma configuração apresentada no cenário anterior, onde a demanda seria aumentada em 10%. Nesta, o tempo de resposta médio aos chamados urbanos também seria reduzido em aproximadamente 12% enquanto esse indicador, para os chamados rurais seria aumentado em aproximadamente 1%. De mesma forma que nos cenários anteriores, o percentual e chamados atendidos no tempo limite indicado em leis internacionais, sofreriam expressiva redução, assim como a taxa de ocupação dos servidores, que seguiram apresentando redução para a unidade USA0009 enquanto as demais, teriam seu tempo de utilização aumentado.

Por fim, os resultados retornados pela estrutura de otimização da simulação, para o cenário de aumento em 20% da demanda do sistema, são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28: Localização estratégica das bases – Aumento da demanda em 20%

Descrição	Configuração atual	Melhor solução encontrada	
Localização	[4, 14, 26]	[8,14,27]	
Alocação das ambulâncias	[[‘USA0009’,‘USB7555’], [‘USB7556’], [‘USB7557’]]	[[‘USB7555’,‘USA0009’], [‘USB7556’], [‘USB7557’]]	
Tempo de resposta médio (min)	Sistema	21,07	18,73
	Urbano	14,68	13,05
	Rural	31,75	28,43
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos	26,13%	13,30%	
% chamados rurais atendidos em até 30 minutos	54,13%	40,05%	
Nº Médio de chamados em fila	0,64	1,75	
Tempo Médio de Espera	1,32	10,80	
Tempo máximo de espera	315,22	714,42	
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	18%	18%
	USB7555	21%	26%
	USB7556	20%	20%
	USB7557	22%	30%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Na configuração apresentada pelo modelo, as ambulâncias USA0009 e USB7555 seriam alocadas na base da sede do município de Ouro Preto, localizada na célula 8. Já a unidade USB7557 deveria ser alocada na célula 27, na sede do município de Mariana. Com esta configuração, neste cenário, o tempo de resposta médio seria de 2 minutos e 20 segundos menor quando comparado com o indicador resultante da configuração atual. Da mesma forma, os tempos de resposta médio, aos chamados das zonas urbanas e rurais, ficariam ambos reduzidos em aproximadamente 10%. Já os percentuais de chamados atendidos dentro dos limites de tempo preconizados pelas leis internacionais de chamados emergenciais, também seriam, assim como nos cenários analisados anteriormente, reduzidos expressivamente.

Para esta nova configuração, em acordo com os resultados, os indicadores de fila apresentam piora: o número médio de chamados aguardando em fila praticamente triplicaria, assim como o tempo médio aguardando em fila, que seria aproximadamente 9 vezes maior. Destaca-se também, a taxa de utilização das ambulâncias USB7555 e

USB7557, que nesta nova configuração, sofreriam um acréscimo de 5% e 8%, respectivamente, em seus tempos de ocupação.

### 5.4.3 Localização estratégica de bases em cenário de alteração de política de despacho

Esta análise objetivou identificar a existência de uma configuração estratégica do sistema, levando em consideração que as ambulâncias alocadas em bases localizadas no município de Mariana, poderiam ser empenhadas para realizar atendimentos originados no município de Ouro Preto. Os resultados deste experimento foram comparados com àqueles obtidos a partir da análise via simulação.

A Tabela 29 apresenta os resultados dessa análise.

Tabela 29: Localização estratégica das bases – Alteração Política de Despacho

Descrição	Configuração atual	Melhor solução encontrada	
Localização	[4, 14,26]	[11,14,27]	
Alocação das ambulâncias	[[‘USA0009’,‘USB7555’], [‘USB7556’],[‘USB7557’]]	[[‘USA0009’,‘USB7555’], [‘USB7556’],[‘USB7557’]]	
Tempo de resposta médio (min)	Sistema	19,88	18,08
	Urbano	14,30	15,51
	Rural	29,23	28,56
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos	27,02%	17,76%	
% chamados rurais atendidos em até 30 minutos	56,32%	47,93%	
<hr/>			
Nº Médio de chamados em fila	0,60	1,22	
Tempo Médio de Espera	1,07	9,81	
Tempo máximo de espera	110,93	615,42	
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	15%	12%
	USB7555	16%	19%
	USB7556	14%	19%
	USB7557	19%	20%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

Com a configuração retornada pelo modelo, o tempo de resposta médio se apresentaria 1 minuto e 43 segundos menor. Nesta, as ambulâncias USA0009 e USB7555 seriam alocadas na base da sede do município de Ouro Preto, localizada na célula 11, enquanto a unidade USB7557 deveria ser alocada na célula 27, na sede do município de Mariana. A terceira base, permaneceria localizada no distrito de Cachoeira do Campo.

O tempo de resposta médio aos chamados originadas em zona rural seria reduzido em aproximadamente 2% de seu valor ao passo que esse mesmo indicador, para os chamados urbanos seriam aumentados em aproximadamente 7%. A nova configuração também acarretaria na redução dos percentuais dos chamados atendidos nos tempos limites indicados pelas leis internacionais. Os indicadores de fila também apresentariam piora, com o número médio de chamados aguardando em fila aumentando em 50,82%, tempo médio de espera maior em aproximadamente 90% e tempo máximo de espera, em aproximadamente 82%. A taxa de ocupação das ambulâncias também se apresentaria maiores, com exceção da ambulância USA0009, cujo valor seria reduzido em 3%.

#### 5.4.4 Localização estratégica de bases em cenário de retirada de uma ambulância do sistema

Buscou-se avaliar, neste cenário, a existência de uma configuração que apresentasse um tempo de resposta reduzido, caso o sistema sofra a redução de uma unidade, seja temporária (manutenção, por exemplo) ou permanente. Ressalta-se que nesta avaliação, a ambulância USB7556 foi retirada., a exemplo do experimento realizado via simulação. A Tabela 30 apresenta os resultados dessa análise bem como a comparação com os resultados obtidos a partir do modelo de simulação.

Tabela 30: Localização estratégica da base – Retirada de 1 ambulância

Descrição	Configuração atual	Melhor solução encontrada	
Localização	[4, 26]	[8, 14, 27]	
Alocação das ambulâncias	[[‘USA0009’, ‘USB7555’], [‘USB7557’]]	[[‘USB7555’], [‘USA0009’], [‘USB7557’]]	
Tempo de resposta médio (min)	Sistema	32,75	27,88
	Urbano	17,47	20,75
	Rural	58,28	31,90
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos	24,67%	17,03%	
% chamados rurais atendidos em até 30 minutos	38,40%	36,92%	
<hr/>			
Nº Médio de chamados em fila	0,77	2,88	
Tempo Médio de Espera	1,97	27,12	
Tempo máximo de espera	1287,57	9456,43	
Taxa de ocupação da ambulância	USA0009	13%	13%
	USB7555	32%	35%
	USB7557	18%	30%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)



Os resultados indicam uma configuração alternativa, onde o tempo de resposta seria reduzido em aproximadamente 5 minutos. Nesta, a ambulância USB7555 devia ser alocada em uma base localizada na célula 8, a USA0009 na célula 14 e USB7557 na célula 27. Tal configuração apresentaria piora nos percentuais de chamados atendidos dentro do limite de tempo preconizados pelos órgãos internacionais, especialmente em se tratando de chamados urbanos. Os indicadores de fila também apresentaram piora, com expressivo aumento em todos os indicadores. Em relação a taxa de ocupação das ambulâncias, destaca-se o aumento desse indicador para a unidade USB7557.

#### 5.4.5 Localização estratégica da base em cenário de retirada de três ambulâncias do sistema

Conforme anteriormente citado, a portaria que regulamenta o serviço de urgência móvel no Brasil, utiliza o número de habitantes da região coberta pelo sistema, como critério de definição do número de ambulâncias. Assim sendo, o sistema objeto de estudo, em acordo com esse critério, teria a disposição, somente uma ambulância do tipo USB.

Neste cenário, buscou-se identificar a melhor localização da base dessa única ambulância, cujo tempo de resposta se apresentasse menor. A Tabela 31 apresenta os resultados.

Tabela 31: Localização estratégica da base – Retirada de 3 ambulâncias

Descrição	Base Ouro Preto	Base Mariana	Melhor solução encontrada	
Localização	[4]	[26]	[11]	
Alocação das ambulâncias	['USB7555']	['USB7555']	['USB7555']	
Tempo de resposta médio (h)	Sistema	775	535	251
	Urbano	47,3	1,33	1,40
	Rural	807	549	265
% chamados urbanos atendidos em até 10 minutos	15,67%	0,66%	8,30%	
% chamados rurais atendidos em até 30 minutos	0,89%	0,28%	0,18%	
<hr/>				
Nº Médio de chamados em fila	389	283	463	
Tempo Médio de Espera (h)	6,67	4,30	4,05	
Tempo máximo de espera	2676	2618	4189	
Taxa de ocupação da ambulância	USB7555	95%	98%	98%

Fonte: Resultados da Pesquisa (2021)

A melhor solução retornada pelo sistema, indica que a base deve ser instalada na localização 11, no município de Ouro Preto. Assim, o tempo de resposta médio do sistema seria menor, 68% quando comparado com a atual localização da base do município de Ouro Preto e 53% menor, se comparado com a atual localização da base em Mariana. Esse mesmo indicador para os chamados urbanos e rurais, seria reduzido em 97% e 67% respectivamente, se comparado com a atual localização da base de Ouro Preto. Já em relação à atual localização da base de Mariana, a solução encontrada apresentaria uma resposta aos chamados urbanos 5% maior, porém, aos chamados rurais, esse indicador seria 52% menor. O percentual de chamados atendidos dentro do limite de tempo indicados pelos órgãos internacionais se apresentariam muito aquém.

Por outro lado, os indicadores de fila para a configuração retornada pelo modelo, apresentaram piora, com o número médio de chamados aguardando em fila 15% maior quando comparado com atual base do município de Ouro Preto e 39% maior, se comparado com atual localização em Mariana. O tempo máximo de espera também apresentou piora de aproximadamente 37% quando comparado com ambas as localizações atuais.

Apesar da expressiva melhora obtida no tempo de resposta médio do sistema, os valores ainda são impraticáveis nesse tipo de serviço. De mesma forma, a taxa de ocupação da equipe também é incompatível com o objetivo de desempenho desse tipo de sistema.

### **5.5 Discussões dos resultados**

A partir do modelo de otimização da simulação, foi possível verificar a localização estratégica das bases e respectivas alocações das ambulâncias, cujo tempo de resposta médio seria reduzido em aproximadamente 10%. Tal configuração dispensa construção de novas instalações visto que já existe uma unidade de saúde instalada na célula indicada pela solução, sendo portanto, de fácil aplicação.

Para os cenários de aumento da demanda, a estrutura de otimização da simulação também apresentou configurações alternativas, onde a localização estratégica das ambulâncias resultaria em tempos de respostas médios reduzidos em, no mínimo, 10% de seu valor. Entretanto, a taxa de ocupação dos servidores realocados, na nova configuração, seria aumentada entre 2 a 8 pontos percentuais. Ainda assim, a taxa de ocupação, em todos os cenários, seria igual ou inferior a 30%.

Foi verificado também, a existência de configurações alternativas, com tempo de resposta reduzido, em cenários de redução do número de ambulâncias do sistema. No cenário de retirada de uma ambulância, o modelo retornou uma configuração onde o tempo de resposta médio do sistema foi reduzido em aproximadamente 15%. Já para o cenário onde o sistema se adequaria ao critério de número de ambulância indicado pela portaria regulamentadora nacional, o modelo apresentou uma localização da base alternativa, que reduziu o tempo de resposta médio em pelo menos 53%. Apesar da grande redução, o indicador ainda se apresentou absurdamente alto.

Ressalta-se que a função de avaliação utilizada neste estudo, vislumbra identificar configurações alternativas que melhorasse o desempenho do sistema sob a perspectiva do tempo de resposta médio. A incorporação de outros fatores à função de avaliação, tornado o problema multi-objetivo, poderia ser aplicada para encontrar soluções de melhora no tempo de resposta de forma simultânea à melhora de outras métricas de desempenho.

## 6 CONCLUSÕES

A aleatoriedade inerente às operações dos sistemas médicos de emergência, torna a gestão de seus processos bastante desafiadora. Neste sentido, desenvolver ferramentas que sejam eficientes e facilmente adaptáveis a análises de novos cenários é bastante relevante.

Neste trabalho, uma estrutura baseada nos conceitos de simulação de eventos discretos foi desenvolvida em linguagem Python e se mostrou eficiente ao representar às operações do SAMU de Ouro Preto e Mariana, onde os resultados da simulação de um período correspondente a um ano eram obtidos em apenas 2 segundos. A estrutura desenvolvida proporcionou ainda, grande facilidade e adaptabilidade para se analisar cenários alternativos.

Os resultados obtidos através do modelo de simulação, demonstraram que a alteração da política de despacho de ambulância, resultaria em redução do tempo de resposta em valor inferior a 1 minuto. Assim, a alteração poderá ser aplicada, desde que subsidiada por um estudo que considere os custos operacionais envolvidos. Demonstraram também que a realocação de ambulância para bases onde há maior demanda, pioraria o desempenho do sistema, já que o tempo de resposta médio se apresentaria aumentado. Para os cenários de redução do número de ambulâncias do sistema, observou-se que a retirada de uma unidade impactaria fortemente o desempenho do sistema, com o aumento de aproximadamente 50% no tempo de resposta médio do sistema. Já a retirada de 3 unidades de resgate, adequando-se ao critério indicado pelas leis nacionais do serviço móvel de urgência, resultaria em valores exorbitantes e impraticáveis de tempo de resposta. O aumento da demanda também foi analisado e os resultados demonstraram que o sistema seria capaz de absorver um aumento de até 20% sem impactar de forma expressiva, o desempenho atualmente apresentado pelo sistema. Por fim, identificou-se que, para se alcançar um tempo de resposta médio de aproximadamente 8 minutos, tal qual é preconizado pela OMS, seria necessário que o sistema estudado disponibilizasse 30 unidades de resgate, alocadas em 26 bases.

No modelo de otimização da simulação, a meta-heurística *Simulated Annealing* foi integrada à estrutura de simulação de eventos discretos e observou-se a eficiência do método de solução aproximada. Resultados satisfatórios foram obtidos com custos computacionais e tempos de execução adequados, visto que o tempo médio para se obter tais resultados foi de 7 horas e 32 minutos. Como o objetivo da estrutura é tratar um

problema de localização de bases e alocação das ambulâncias, tal qual é considerado um problema de médio prazo, obter uma solução em um prazo de aproximadamente 8 horas valida a eficiência do modelo.

O modelo de otimização da simulação, foi capaz de retornar uma configuração estratégica que reduzira o tempo de resposta médio do sistema em aproximadamente 10%. A mesma redução foi obtida com as soluções alternativas apresentadas pelo modelo, para os cenários de aumento de demanda. Ao se verificar a existência de uma configuração alternativa para os cenários de redução do número de ambulâncias, verificou-se a possibilidade de se reduzir o tempo médio de resposta em 15%, a partir de uma nova configuração, caso fosse retirado uma ambulância do sistema. Para o cenário onde o sistema operaria somente com uma ambulância, adequando-se ao regulamentado pela portaria nacional, que define que uma ambulância deve ser alocada para atender a cada 150 mil habitantes, o modelo desenvolvido apresentou uma solução onde o tempo de resposta médio seria reduzido em pelo menos 53%, ainda que sendo este, extremamente elevado.

As métricas de desempenho indicados pelos órgãos internacionais de saúde e suas respectivas leis para atendimento de chamado emergenciais são boas referências a serem utilizadas pelos gestores de SME ao se determinar os indicadores de qualidade. Porém, verifica-se, a partir dos resultados obtidos, que uma configuração que melhora o indicador preconizado por uma norma, pode, simultaneamente, piorar o indicador regido por outra, tornando imprescindível uma definição clara, do objetivo a ser alcançado, ao se utilizar as ferramentas de análise de desempenho.

Os resultados obtidos indicam também, a necessidade de se considerar outros aspectos variáveis, tais como, extensão territorial, complexidades geográficas e infraestruturas locais, em conjunto com o número de habitantes, ao se determinar o número necessário de ambulâncias para se atender as demandas de urgência no serviço pré-hospitalar, cuja configuração atenda os indicadores de desempenho almejados.

Como sugestão de trabalho futuros e de melhoria para o modelo desenvolvido, sugere-se integrar ao modelo, meta-heurísticas alternativas, como Algoritmos Genéticos ou GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) com o objetivo de comparar suas respectivas eficiências. Ademais, sugere-se também, a incorporação de uma função de avaliação multi-objetivo, que considere além do tempo de resposta, outras métricas,

buscando encontrar soluções que melhorem o desempenho do sistema a partir de múltiplos indicadores.

## REFERÊNCIAS

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**, [s.l.], v. 47, p.46-59, set. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2014.05.007>.

ABOUELJINANE, L.; SAHIN, E.; JEMAI, Z.. A review on simulation models applied to emergency medical service operations. **Computers & Industrial Engineering**, [s.l.], v. 66, n. 4, p.734-750, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2013.09.017>

ALMEHDAWE, E.; JEWKES, B.; HE, Q.. Analysis and optimization of an ambulance offload delay and allocation problem. **Omega**, [s.l.], v. 65, p.148-158, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.omega.2016.01.006>.

APRIL, J.; GLOVER, F.; KELLY, J.p.; LAGUNA, M.. Practical introduction to simulation optimization. **Proceedings Of The 2003 International Conference On Machine Learning And Cybernetics (ieec Cat. No.03ex693)**, [s.l.], p. 71-78, 2003. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wsc.2003.1261410>.

ARINGHIERI, R.; CARELLO, G.; MORALE, D.. Supporting decision making to improve the performance of an Italian Emergency Medical Service. **Annals Of Operations Research**, [s.l.], v. 236, n. 1, p.131-148, 5 nov. 2013. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-013-1487-0>

BANKS, J. (ed.). Handbook of Simulation: principles, methods, advances, applications and practice. Nova York: John Wiley & Sons, Inc., 1998. 840 p.

BANKS, J. *et al.* Discrete-Event System Simulation. 4. ed. Upper Saddle River: Pearson Prattice Hall, 2004. 608 p.

BÉLANGER, V. *et al.* A recursive simulation-optimization framework for the ambulance location and dispatching problem. **European Journal Of Operational Research**, [S.L.], v. 286, n. 2, p. 713-725, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2020.03.041>

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**, [s.l.], v. 272, n. 1, p.1-23, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.02.055>

BLACKWELL, T. H.; KAUFMAN, J. S.. Response Time Effectiveness: Comparison of Response Time and Survival in an Urban Emergency Medical Services System. **Academic Emergency Medicine**, [s.l.], v. 9, n. 4, p.288-295, abr. 2002. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1197/aemj.9.4.288>.

BRASIL. Decreto nº 5055 de 27 de Abril de 2004. Institui o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência – SAMU, em Municípios e regiões do território nacional, e dá outras providências. Brasília, 2004. Disp. em:

<https://presrepublica.jusbrasil.com.br/legislacao/97783/decreto-5055-04>. Acesso em: 20 de maio 2019.

BRASIL. Política nacional de atenção às urgências. 3. ed. ampl. Brasília, 2006. Disp. em: [http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica\\_nacional\\_atencao\\_urgencias\\_3ed.pdf](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica_nacional_atencao_urgencias_3ed.pdf). Acesso em: 20 de maio 2019.

BRASIL. Portaria n.º 1.600/GM, de 07 de julho de 2011. Brasília, 2011. Disp. em: [bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt1600\\_07\\_07\\_2011.html](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt1600_07_07_2011.html). Acesso em: 20 maio 2019.

BRASIL. Portaria n.º 1.863/GM, de 29 de setembro de 2003. Brasília, 2003a. Disp. em: [http://www.cremesp.org.br/library/modulos/legislacao/integras\\_pdf/PORT\\_MS\\_GM\\_20\\_48\\_2002.pdf](http://www.cremesp.org.br/library/modulos/legislacao/integras_pdf/PORT_MS_GM_20_48_2002.pdf). Acesso em: 20 maio 2019.

BRASIL. Portaria n.º 1.864/GM, de 29 de setembro de 2003. Brasília, 2003b. Disp. em: [http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2003/prt1864\\_29\\_09\\_2003.html](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2003/prt1864_29_09_2003.html). Acesso em: 20 maio 2019.

BRASIL. Portaria n.º 2048/GM, de 05 de novembro de 2002. Brasília, 2002. Disp. em: [http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2002/prt2048\\_05\\_11\\_2002.html](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2002/prt2048_05_11_2002.html).

Acesso em: 20 maio 2019  
BRASIL. Política nacional de atenção às urgências. 3. ed. ampl. Brasília, 2006. Disp. em: [http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica\\_nacional\\_atencao\\_urgencias\\_3ed.pdf](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/politica_nacional_atencao_urgencias_3ed.pdf). Acesso em: 20 de maio 2019.

BYRNE, J. P. *et al.* Association Between Emergency Medical Service Response Time and Motor Vehicle Crash Mortality in the United States. **Jama Surgery**, [s.l.], v. 154, n. 4, p.286-293, 1 abr. 2019. American Medical Association (AMA). <http://dx.doi.org/10.1001/jamasurg.2018.5097>

CARSON, Y.; MARIA, A.. Simulation optimization. **Proceedings Of The 29th Conference On Winter Simulation - Wsc '97**, [s.l.], p. 118-126, 1997. ACM Press. <http://dx.doi.org/10.1145/268437.268460>.

CHEN, Shuai; PAN, Quan-Ke; GAO, Liang. Production scheduling for blocking flowshop in distributed environment using effective heuristics and iterated greedy algorithm. **Robotics And Computer-Integrated Manufacturing**, [S.L.], v. 71, p. 102155, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102155>.

CHWIF,L.; MEDINA, A. C.. Modelagem e Simulação de Eventos Discretos. 4. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

COELHO, G.; PINTO, L. R. Kriging-based simulation optimization: An emergency medical system application. **Journal Of The Operational Research Society**, [s.l.], v. 69, n. 12, p.2006-2020, 15 fev. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01605682.2017.1418149>.

DAVOUDPOUR, H.; MORTAZ, E.; HOSSEINIJOU, S. A.. A new probabilistic coverage model for ambulances deployment with hypercube queuing approach. **The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology**, [s.l.], v. 70, n. 5-8,



p.1157-1168, 17 out. 2013. Springer Science and Business Media LLC.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5336-8>

DÍAZ, P. *et al.* Metaheurísticas de optimización combinatoria: uso de Simulated Annealing para un problema de calendarización. **Tecnología y desarrollo**, v.5, 2007. Disponível em:  
 <[https://www.researchgate.net/publication/28215716\\_Metaheurísticas\\_de\\_optimización\\_combinatoria\\_uso\\_de\\_Simulated\\_Annealing\\_para\\_un\\_problema\\_de\\_calendarización](https://www.researchgate.net/publication/28215716_Metaheurísticas_de_optimización_combinatoria_uso_de_Simulated_Annealing_para_un_problema_de_calendarización)>  
 Acesso em 02 de jan. de 2020.

DIBENE, J. C. *et al.* Optimizing the location of ambulances in Tijuana, Mexico. **Computers In Biology And Medicine**, [s.l.], v. 80, p.107-115, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compbiomed.2016.11.016>.

DICK, W. F.. Anglo-American vs. Franco-German Emergency Medical Services System. **Prehospital And Disaster Medicine**, [s.l.], v. 18, n. 1, p.29-37, mar. 2003. Cambridge University Press (CUP). <http://dx.doi.org/10.1017/s1049023x00000650>.

DORIGO, Marco *et al.* Ant Colony Optimization: overview and recent advances. In: HANDBOOK of Metaheuristics. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2019. Cap. 2. p. 311-354. (International Series in Operations Research & Management Science).

ESKANDARI, H. *et al.* Performance analysis of comercial simulation-based optimization packages: OptQuest and Witness Optimizer. **Proceedings Of The 2011 Winter Simulation Conference (wsc)**, [s.l.], p.2363-2373, dez. 2011. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wsc.2011.6147946>.

FISHER, M. L.. The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems. **Management Science**, [s.l.], v. 50, n. 12, p. 1861-1871, dez. 2004. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/mnsc.1040.0263>.

GENDREAU, Michel *et al.* Tabu Search. In: HANDBOOK of Metaheuristics. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2019. Cap. 2. p. 37-56. (International Series in Operations Research & Management Science).

GOLABIAN, Hamed *et al.* A simulation-optimization algorithm for return strategies in emergency medical systems. **Simulation**, [S.L.], p. 003754972110061, 25 abr. 2021. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/00375497211006175>.

GOLDBARG, M. C.; GOLDBARG, E. G.; LUNA, H. P. L. **Otimização Combinatória e Metaheurísticas**: Algoritmos e Aplicações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

GONZALEZ, R. P. *et al.* Does increased emergency medical services prehospital time affect patient mortality in rural motor vehicle crashes? A statewide analysis. **The American Journal Of Surgery**, [s.l.], v. 197, n. 1, p.30-34, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.amjsurg.2007.11.018>.

HAKIMI, S. L.. Optimum Locations of Switching Centers and the Absolute Centers and Medians of a Graph. **Operations Research**, [S.L.], v. 12, n. 3, p. 450-459, jun. 1964. Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS). <http://dx.doi.org/10.1287/opre.12.3.450>.

HANSEN, Pierre *et al.* Variable Neighborhood Search. In: HANDBOOK of Metaheuristics. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2019. Cap. 7. p. 57-97. (International Series in Operations Research & Management Science).

HIGINO, W. *et al.* Metaheurísticas Simulated Annealing e Pesquisa em Vizinhança Variável aplicadas ao problema de Roteamento Periódico de Veículos para coleta de lixo. In: Simpósio Brasileiro De Pesquisa Operacional, 44., 2012, Rio de Janeiro. **Proceedings of the Brazilian Symposium on Operations Research**. Rio de Janeiro: Sobrapo, 2012. p. 2636-2645. Disponível em: <http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2012/pdf/arg0393.pdf>. Acesso em: 09 set. 2019.

HONG, L. J.; NELSON, B. L.. A brief introduction to optimization via simulation. **Proceedings Of The 2009 Winter Simulation Conference (wsc)**, [s.l.], p. 75-85, dez. 2009. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wsc.2009.5429321>.

HU, X.; BARNES, S.; GOLDEN, B. Applying queueing theory to the study of emergency department operations: a survey and a discussion of comparable simulation studies. **International Transactions In Operational Research**, [s.l.], v. 25, n. 1, p.7-49, 7 mar. 2017. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1111/itor.12400>

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em 18 de janeiro de 2020.

JANG, H.; LEE, J. A hierarchical location model for determining capacities of neonatal intensive care units in Korea. **Socio-economic Planning Sciences**, [s.l.], p.1-14, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seps.2019.03.001>.

KARATAS, M.; YAKICI, E.. An analysis of p-median location problem: Effects of backup service level and demand assignment policy. **European Journal Of Operational Research**, [s.l.], v. 272, n. 1, p.207-218, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2018.06.017>

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; ZUPICK, N. B.. **Simulation with Arena**. 6. ed. Nova York: Mcgraw-hill Education, 2015. 655 p.

KESHTKAR, L.; SALIMIFARD, K.; FAGHIH, N.. A simulation optimization approach for resource allocation in an emergency department. **Qscience Connect**, [s.l.], v. 2015, n. 1, p.8-18, abr. 2015. Hamad bin Khalifa University Press (HBKU Press). <http://dx.doi.org/10.5339/connect.2015.8>.

KIRKPATRICK *et al.* Optimization by Simulated Annealing. **Science**, [s.l.], v. 220, n. 4598, p.671-680, 13 maio 1983. American Association for the Advancement of Science (AAAS). <http://dx.doi.org/10.1126/science.220.4598.671>.

LAW, A. M.; KELTON W. D. **Simulation Modeling and Analysis**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 2000.784 p.

LAW, A.; MCCOMAS, M.. Simulation-based optimization. **Proceedings Of The Winter Simulation Conference**, [s.l.], p.41-44, dez. 2002. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wsc.2002.1172866>.

LEAL, Fabiano *et al.* Desenvolvimento e aplicação de uma técnica de modelagem conceitual de processos em projetos de simulação: o IDEF-SIM. In: ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 29, 2009, Salvador. Anais. Salvador: Abepro, 2009. Disponível em: [http://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009\\_tn\\_sto\\_096\\_652\\_12990.pdf](http://abepro.org.br/biblioteca/enegep2009_tn_sto_096_652_12990.pdf). Acesso em: 10 de out. 2020.

LEE, K.y.; YANG, F.F.. Optimal reactive power planning using evolutionary algorithms: a comparative study for evolutionary programming, evolutionary strategy, genetic algorithm, and linear programming. **Ieee Transactions On Power Systems**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 101-108, fev. 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/59.651620>.

LOURENÇO, Helena Ramalinho *et al.* Iterated Local Search: framework and applications. In: HANDBOOK of Metaheuristics. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2019. Cap. 5. p. 129-168. (International Series in Operations Research & Management Science).

MARTÍ, Rafael *et al.* Intelligent Multi-Start Methods. In: HANDBOOK of Metaheuristics. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2019. Cap. 7. p. 221-243. (International Series in Operations Research & Management Science).

MAGHFIROH, M.; HOSSAIN, M.; HANAOKA, S.. Minimising emergency response time of ambulances through pre-positioning in Dhaka city, Bangladesh. **International Journal Of Logistics Research And Applications**, [s.l.], v. 21, n. 1, p.53-71, 6 ago. 2017. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/13675567.2017.1361390>.

MCCORMACK, R.; COATES, G.. A simulation model to enable the optimization of ambulance fleet allocation and base station location for increased patient survival. **European Journal Of Operational Research**, [s.l.], v. 247, n. 1, p.294-309, nov. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.040>.

MWESHI, George; PILLAY, Nelishia. An improved grammatical evolution approach for generating perturbative heuristics to solve combinatorial optimization problems. **Expert Systems With Applications**, [S.L.], v. 165, p. 113853, mar. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113853>.

NAIR, Rahul; MILLER-HOOKS, Elise. Evaluation of Relocation Strategies for Emergency Medical Service Vehicles. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2137, n. 1, p. 63-73, jan. 2009. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2137-08>.

NILSANG, S. *et al.* Locating an ambulance base by using social media: a case study in Bangkok . **Annals of Operations Research** [s.l.],p. 1-20, 05 jun. 2018. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s10479-018-2918-8>

NOGUEIRA JUNIOR, L. C.; PINTO, L. R.; SILVA, P. M. S.. Reducing Emergency Medical Service response time via the reallocation of ambulance bases. **Health Care Management Science**, [s.l.], v. 19, n. 1, p.31-42, 18 abr. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10729-014-9280-4>

PANTUZA JR., G. Métodos de otimização multiobjetivo e de simulação aplicados ao problema de planejamento operacional de lavra em minas a céu aberto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral

do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, MG. p. 103.

PELL, J. P. *et al.* Effect of reducing ambulance response times on deaths from out of hospital cardiac arrest: cohort study. **Bmj**, [s.l.], v. 322, n. 7299, p.1385-1388, 9 jun. 2001. BMJ. <http://dx.doi.org/10.1136/bmj.322.7299.1385>.

PEREIRA, W. A. P.; LIMA, M. A. D. S. O trabalho em equipe no atendimento pré-hospitalar à vítima de acidente de trânsito. *Revista da Escola de Enfermagem da Usp*, [s.l.], v. 43, n. 2, p. 320-327, jun. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0080-62342009000200010>.

PINTO, L.; SILVA, P.; YOUNG, T.. A generic method to develop simulation models for ambulance systems. **Simulation Modelling Practice And Theory**, [s.l.], v. 51, p.170-183, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.simpat.2014.12.001>

PONS, P. T; MARKOVCHICK, V. J. Eight minutes or less: does the ambulance response time guideline impact trauma patient outcome?. **The Journal Of Emergency Medicine**, [s.l.], v. 23, n. 1, p.43-48, jul. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0736-4679\(02\)00460-2](http://dx.doi.org/10.1016/s0736-4679(02)00460-2).

PRADO, D. S.. **Usando o Arena em Simulação**. 5. ed. Nova Lima: Falconi, 2015. 3 v.

RESENDE, Mauricio G. C. *et al.* Greedy Randomized Adaptive Search Procedures: advances and extensions. In: **HANDBOOK of Metaheuristics**. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2019. Cap. 2. p. 169-220. (International Series in Operations Research & Management Science).

ROBINSON, S.t. **Simulation: the practice of model development and use**. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 338 p.

SANTANA, M. M.; BOERY, R. N. S. O.; SANTOS, J. Debilidades atribuídas pela comunidade de Jequié ao serviço de atendimento móvel de urgência. *Ciência, Cuidado e Saúde*, [s.l.], v. 8, n. 3, p. 444-451, 10 dez. 2009. Universidade Estadual de Maringá. <http://dx.doi.org/10.4025/ciencucuidsaude.v8i3.9045>.

SCHNEEBERGER, K. *et al.* Ambulance location and relocation models in a crisis. **Central European Journal Of Operations Research**, [s.l.], v. 24, n. 1, p.1-27, 27 jul. 2014. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10100-014-0358-3>

SHEIKH, A. A. R. ; AJEILI; TAIEH, E. M. O.. **Simulation and Modeling: current technologies and applications**. Nova York: Igi Publishing, 2008. 466 p.

SILVA, P. M. S. **Análise do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) de Belo Horizonte via simulação e otimização**. 2010. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/NVEA-857J3G>. Acesso em: 13 de maio de 2019.

SILVA, P. M. S.; PINTO, L. R.. Análise do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) de Belo Horizonte via Simulação e Otimização. In: Simpósio Brasileiro de

Pesquisa Operacional, 42, 2010, Bento Gonçalves. **Proceedings of the Brazilian Symposium on Operations Research**. Rio de Janeiro: Sobrapo, 2010. p. 2632 - 2643.

SILVER, E. A. An overview of heuristic solution methods. **Journal Of The Operational Research Society**, [s.l.], v. 55, n. 9, p. 936-956, set. 2004. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601758>.

SOUZA, R. M. *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**, [s.l.], v. 242, n. 1, p.274-285, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2014.09.056>.

SU, Q.; LUO, Q.; HUANG, S... Cost-effective analyses for emergency medical services deployment: A case study in Shanghai. **International Journal Of Production Economics**, [s.l.], v. 163, p.112-123, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijpe.2015.02.0154>

ÜNLÜYURT, T.; TUNÇER, Yasir. Estimating the performance of emergency medical service location models via discrete event simulation. **Computers & Industrial Engineering**, [s.l.], v. 102, p.467-475, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2016.03.029>

VASQUEZ, J. C. D. (2017) Programação de tarefas em um ambiente flow shop com máquinas para a minimização do desvio absoluto total de uma data de entrega comum. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Programa de Pós-Graduação em Ciências do Instituto de Matemática e Estatística da Universidade São Paulo. São Paulo, SP. p. 58.

WHITLEY, Darrell . Next Generation Genetic Algorithms: a user's guide and tutorial. In: **HANDBOOK of Metaheuristics**. 3. ed. [S.I.]: Springer, 2019. Cap. 2. p. 245-275. (International Series in Operations Research & Management Science).

XIE, J. *et al.* Determining the conditions for reverse triage in emergency medical services using queuing theory. **International Journal Of Production Research**, [s.l.], v. 54, n. 11, p.3347-3364, 8 nov. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2015.1109718>.

ZAFFAR, M. A. *et al.* Coverage, survivability or response time: A comparative study of performance statistics used in ambulance location models via simulation–optimization. **Operations Research For Health Care**, [s.l.], v. 11, p.1-12, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.orhc.2016.08.001>.

ZHEN, L. *et al.* A simulation optimization framework for ambulance deployment and relocation problems. **Computers & Industrial Engineering**, [s.l.], v. 72, p.12-23, jun. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2014.03.008>

ZUCCARATTO, J. Município de Ouro Preto exhibe beleza, cultura, história, lendas, natureza. **Zuccaratto**, 28 de out de 2015. Disp. ponível em: < <https://www.turismoria.com.br/turismo-e-cia/municipio-de-ouro-preto-exibe-beleza-cultura-historia-lendas-natureza/>>. Acesso em: 15 dez. de 2019