

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AERONÁUTICA



Eduardo Campos Silva

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA DO
SERVIÇO DE ATENDIMENTO MÓVEL DE
URGÊNCIA (SAMU) POR MEIO DO MODELO
HIPERCUBO DE FILAS NO CAMPO DA
PESQUISA OPERACIONAL**

Trabalho de Graduação
2019

Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

Eduardo Campos Silva

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA DO SERVIÇO
DE ATENDIMENTO MÓVEL DE URGÊNCIA (SAMU) POR
MEIO DO MODELO HIPERCUBO DE FILAS NO CAMPO DA
PESQUISA OPERACIONAL**

Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres

Orientador

ENGENHARIA CIVIL-AERONÁUTICA

São José dos Campos, SP – Brasil

Instituto Tecnológico de Aeronáutica

2019

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

CAMPOS SILVA, Eduardo

Análise de desempenho do sistema do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) por meio do modelo hipercubo de filas no campo da pesquisa operacional / Eduardo Campos Silva.

São José dos Campos, 2019.

62f.

Trabalho de Graduação – Engenharia Civil-Aeronáutica – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2019. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres

1. Modelo hipercubo. 2. Sistema de atendimento de emergência. 3. Tempo de resposta. I. Instituto Tecnológico de Aeronáutica. II. Análise de desempenho do sistema do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) por meio do modelo hipercubo de filas no campo da pesquisa operacional

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

SILVA, Eduardo Campos. **Análise de desempenho do sistema do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) por meio do modelo hipercubo de filas no campo da pesquisa operacional**. 2019. 62f. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Civil-Aeronáutica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Eduardo Campos Silva

TÍTULO DO TRABALHO: Análise de desempenho do sistema do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) por meio do modelo hipercubo de filas no campo da pesquisa operacional

TIPO DO TRABALHO/ANO: Graduação / 2019

É concedida ao Instituto Tecnológico de Aeronáutica permissão para reproduzir cópias deste trabalho de graduação e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste trabalho de graduação pode ser reproduzida sem a autorização do autor.



Eduardo Campos Silva
Alameda Sarutaiá, 353
01403-010, São Paulo - SP

ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA DO SERVIÇO DE ATENDIMENTO MÓVEL DE URGÊNCIA (SAMU) POR MEIO DO MODELO HIPERCUBO DE FILAS NO CAMPO DA PESQUISA OPERACIONAL

Essa publicação foi aceita como Relatório Final de Trabalho de Graduação



Eduardo Campos Silva

Autor



Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres (ITA)

Orientador



Prof. Dr. Eliseu Lustosa Neto

Coordenador do Curso de Engenharia Civil-Aeronáutica

São José dos Campos, 26 de novembro de 2019

Este trabalho é dedicado a minha família e amigos.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, que desde pequeno me educou e me ensinou a lutar pelos meus objetivos. Em especial ao meu pai, Rubens, e à minha mãe, Vanêssa, que sempre me deram muito amor, além de tudo que um filho precisa para ser feliz. Em especial também aos meus irmãos, Henrique e Guilherme, meus amigos de mesma mãe, que dividiram boa parte da vida ao meu lado.

Agradeço também a todos os meus amigos, por estarem presentes em momentos difíceis, fáceis, felizes e tristes. Quem me conhece sabe o quanto valorizo minhas amizades, e posso dizer que tenho as melhores!

Agradeço aos professores e educadores que me permitiram adquirir conhecimento para chegar onde cheguei. Em especial ao professor Marcelo Guterres, que me orientou no presente trabalho e teve papel fundamental no meu último ano de faculdade.

Finalmente, agradeço ao Gabigol por fazer os dois gols da virada na final da Copa Libertadores, trazendo o título para o Mais Querido 38 anos depois, me dando forças para apresentar e entregar o presente trabalho alguns dias depois.

Resumo

O desenvolvimento de modelos de localização tem apresentado um papel importante no aprimoramento dos sistemas de atendimento de emergência. Suas aplicações têm uma consequência direta no nível operacional de um sistema real: a redução do tempo de atendimento e, principalmente, do tempo de resposta a um chamado de ocorrência. A escolha de um modelo adequado tem se mostrado eficaz na análise da eficiência de serviços de atendimento emergenciais. O presente trabalho efetua uma análise de desempenho do SAMU de Bagé, Rio Grande do Sul, aplicando-se o modelo hipercubo de filas. Esse modelo matemático probabilístico realiza a análise a partir do cálculo e avaliação de medidas de desempenho, considerando o caráter estocástico do processo de chegadas e atendimento de chamados. A partir da validação do modelo, criaram-se cenários alternativos ao atual sistema presente na cidade, trazendo resultados teóricos positivos.

Abstract

The development of location models has played an important role in improving emergency care systems. Its applications have a direct consequence on the operational level of a real system: the attendance time reduction and, mainly, the response time to an occurrence call reduction. Choosing an appropriate model has been shown to be effective in analyzing the emergency care services efficiency. The present work performs a performance analysis of the SAMU of Bagé, Rio Grande do Sul, applying the hypercube queuing model. This probabilistic mathematical model performs the analysis by the calculation and evaluation of performance measures, considering the stochastic character of the arrival and call handling process. From the model validation, alternative scenarios were created to the current system present in the city, bringing positive theoretical results.

Lista de Tabelas

5.1	Variáveis gerais por equipe do sistema do SAMU de Bagé	44
5.2	Variáveis gerais por equipe do sistema do SAMU de Bagé para o período de pico	45
5.3	Variáveis gerais do sistema do SAMU de Bagé para o período de pico . . .	49
5.4	Taxas médias de chegadas de chamados por átomo	49
5.5	Matriz dos tempos de viagem entre átomos	49
5.6	Matriz de localização dos servidores	50
5.7	Preferência de despachos	52
5.8	Taxas médias de atendimento do sistema e servidores	52
6.1	Probabilidades dos possíveis estados do sistema	54
6.2	<i>Workloads</i> dos servidores para o sistema atual	55
6.3	Casos de descentralização dos servidores 2 e 3	57

Lista de Figuras

3.1	Exemplo de região de atuação de um sistema [24]	27
3.2	Espaço de estados para $N=3$ servidores [24]	28
4.1	Localização de Bagé no Rio Grande do Sul	38
4.2	Mapa geral de Bagé	39
4.3	Localização da base do SAMU e UPA na cidade de Bagé	40
4.4	Informações da base de dados do SAMU de Bagé	42
5.1	Distribuição dos chamados ao longo dos meses	44
5.2	Distribuição dos chamados em cada hora do dia	45
5.3	Distribuição espacial das ocorrências médicas na cidade de Bagé	47
5.4	Centros de demanda de chamados da cidade de Bagé	48
5.5	Distribuição dos atendimentos dos servidores na cidade de Bagé	51

Sumário

1	Introdução	13
1.1	Problema de pesquisa	14
1.2	Objetivo geral	15
1.3	Objetivos específicos	15
1.4	Justificativa	15
1.5	Limitação	16
2	Serviços de Atendimento Emergencial	17
2.1	Serviço de Atendimento Emergencial Médico	18
2.2	SAMU no Brasil	19
2.3	Problemas associados aos serviços de atendimento emergencial	20
2.3.1	Número de servidores em uma região	20
2.3.2	Programação de equipes	21
2.3.3	Problemas de localização	21
3	Modelos de Localização	23
3.1	Modelos determinísticos	23
3.2	Modelos probabilísticos	25
3.3	Modelo Hipercubo de Filas	26
3.3.1	Hipóteses do modelo hipercubo	29
3.3.2	Transições entre estados	30
3.3.3	Equações de equilíbrio	31
3.3.4	Medidas de desempenho do sistema	35

3.3.4.1	<i>Workload</i>	35
3.3.4.2	Frequência de despachos	35
3.3.4.3	Tempos médios de viagem	36
4	Cenário e Base de Dados	38
4.1	Cenário escolhido	38
4.2	Tratamento da base de dados do SAMU de Bagé	41
5	Metodologia	43
5.1	Análise estatística do SAMU de Bagé	43
5.2	Aplicação do modelo hipercubo para o SAMU de Bagé	46
5.2.1	Parâmetros do sistema	46
5.2.1.1	Átomos geográficos	46
5.2.1.2	Taxas médias de chegadas de chamados	48
5.2.1.3	Tempos de viagem	49
5.2.1.4	Servidores	50
5.2.1.5	Matriz de localização	50
5.2.1.6	Despacho dos servidores	50
5.2.1.7	Ordem de preferência dos despachos	51
5.2.1.8	Taxas médias de atendimentos	52
5.2.2	Equações de equilíbrio do sistema	52
6	Análise dos Resultados	54
6.1	Resultados da modelagem para o sistema atual	54
6.1.1	<i>Workloads</i>	55
6.1.2	Tempos médios de viagem	56
6.2	Sistemas alternativos	56
7	Considerações Finais	58

Capítulo 1

Introdução

A ciência é responsável por propiciar avanços em diversas áreas da saúde, objetivando proteger o que há de mais importante para o homem: a vida. Com a evolução do conhecimento científico e o avanço tecnológico, foi possível aprimorar essa proteção em vários âmbitos. Um deles diz respeito ao sistema de atendimento para indivíduos que foram vítimas de situações de urgência ou emergência, podendo estar sujeitos ao sofrimento, sequelas ou morte.

Nesse contexto se insere o Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU), componente fundamental da Política Nacional de Atenção às Urgências, implementada pelo Ministério da Saúde. Esse é o serviço responsável atualmente por prestar socorro médico emergencial à população, salvando vidas.

Com o advento do SAMU, o aperfeiçoamento do sistema de atendimento de emergência passou a se dar pelo estudo do modelo de localização e operação do mesmo, visando encontrar soluções cada vez mais eficientes. Como a intenção do sistema é prestar socorro às vítimas da forma mais rápida possível, o fator preponderante para aprimorar o atendimento é reduzir o tempo total de atendimento (TT). Esse tempo é constituído, no presente trabalho, por dois termos: o tempo de resposta (TR), que é o tempo entre a solcitação pelo serviço e a chegada da equipe médica ao local da ocorrência, e o tempo em cena (TC), que é composto pelo tempo de atendimento no local, tempo de deslocamento até a unidade médica de destinação do paciente e tempo de retorno à base.

O TR tem influência direta no nível de serviço do sistema de atendimento de emer-

gência. Ele é composto pelos seguintes intervalos: tempo de espera ou de preparo da equipe e tempo de deslocamento até o local da ocorrência. Esses intervalos dependem, portanto, de fatores como a experiência e capacitação profissional da equipe, condições de tráfego no local, dia da semana e período do dia, tipo e número de veículos disponíveis e suas localizações. O tempo de resposta deve ser o menor possível, pois é a partir dele que o paciente começa a receber atendimento médico especializado. O tempo total de atendimento também é medida de desempenho do sistema, pois representa a taxa de serviço com a qual os servidores (ambulâncias) e suas equipes médicas atuam.

Os modelos de localização utilizados atualmente são classificados em duas categorias: modelos determinísticos e modelos probabilísticos (estocásticos). Os modelos determinísticos são mais simplistas, determinando a solução ótima para o problema sem considerar o caráter estocástico de um sistema de atendimento de emergência, não conta com servidores sempre disponíveis. Já os modelos probabilísticos são mais sofisticados, não necessariamente determinando a solução ótima do problema, mas realizando uma análise a partir de medidas de desempenho do sistema, e garantindo que a probabilidade de um servidor se encontrar ocupado seja levada em conta.

O presente trabalho aplica o *modelo hipercubo de filas*, um modelo de localização probabilístico que tem como objetivo representar o sistema real de um cenário escolhido e efetuar a análise das medidas de desempenho de um sistema. A aplicação desse modelo se dá pelo conhecimento de diversas informações do sistema real, que, no caso, será o sistema de atendimento do SAMU de Bagé, Rio Grande do Sul.

1.1 Problema de pesquisa

Atualmente, os serviços de atendimento emergencial médico dispõem de diversos estudos na literatura para aprimorar suas operações. O problema de pesquisa se dá pela busca de uma configuração mais adequada para o serviço, aplicando, para um cenário escolhido, um modelo matemático de localização e analisando a eficiência do SAMU a partir das variáveis de desempenho.

1.2 Objetivo geral

O presente Trabalho de Graduação tem como objetivo analisar as medidas de desempenho do Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) para um cenário que, no caso, consistiu em uma cidade brasileira. Para tanto, será utilizado um modelo matemático probabilístico sofisticado: o *modelo hipercubo de filas*. O modelo será comparado aos modelos mais simples e presentes na literatura, avaliando, assim, a configuração atual do SAMU e definindo cenários alternativos para aumentar seu desempenho no cenário escolhido.

1.3 Objetivos específicos

1. Discorrer sobre os diversos modelos de localização presentes na literatura;
2. Explicar sobre o modelo hipercubo de filas;
3. Definir um cenário para aplicação do modelo;
4. Tratar a base de dados do SAMU para o cenário escolhido;
5. Aplicar o modelo no cenário escolhido;
6. Verificar a validade da aplicação do modelo;
7. Analisar o desempenho do SAMU no cenário escolhido e avaliar alternativas.

1.4 Justificativa

Dada a importância do tema e as técnicas e modelos mais sofisticados que surgiram ao longo dos anos, é necessário estudar e pesquisar formas de se aumentar o desempenho do serviço de atendimento de emergência. O presente trabalho visa aplicar um modelo de localização mais complexo, expondo práticas mais eficientes em um sistema de extrema importância para a população em geral.

1.5 Limitação

O estudo realizado nesse trabalho utiliza uma base de dados com informações de cinco anos (2011-2015) da cidade de Bagé, Rio Grande do Sul. A cidade conta com cerca de cem mil habitantes, e os dados disponibilizados pelo SAMU da cidade apresentaram diversos problemas de coerência, o que reduziu de forma considerável o espaço amostral para aplicação do modelo. Apesar de não ser a ideal, a base de dados fornecida foi suficiente para a aplicação do modelo de localização.

Capítulo 2

Serviços de Atendimento Emergencial

O serviço de emergência é um dos tipos de serviços de atendimento à população. É o setor que envolve o maior grau de incerteza, ou seja, é impossível se determinar quando e onde ele será solicitado. Dada a incerteza e a necessidade de se atender a toda a população, esse tipo de serviço é de responsabilidade do setor público.

A principal medida de desempenho desse tipo de serviço é o tempo de resposta, isto é, o período entre o instante da solicitação pelo serviço e o início do atendimento junto às vítimas. Para garantir um sistema rápido e eficiente e evitar ao máximo o sofrimento, sequelas ou morte, deve-se reduzir a taxa de utilização dos operadores, servidores e equipamentos. Dessa forma, além de uma equipe capacitada é necessário um planejamento adequado, utilizando, por exemplo, uma metodologia que avalie o caráter probabilístico inerente a esse tipo de serviço.

Existem três serviços de atendimento emergencial: corpo de bombeiros, polícia e ambulâncias. O corpo de bombeiros é o responsável pelo socorro em situações de incêndio e destruição, além de auxiliar o serviço de emergência médico em situações de salvamento de vidas, utilizando veículos com equipamentos de combate ao fogo, vazamento de gases tóxicos e salvamento das vítimas. A polícia opera utilizando viaturas com um ou mais policiais [24], atuando em setores específicos da cidade em que atua com o objetivo de combater a criminalidade.

As ambulâncias são os principais componentes do serviço de emergência médico, responsáveis por prestar socorro médico emergencial à população a partir do atendimento

e transporte das vítimas. As características desse tipo de serviço de emergência serão explicitadas a seguir.

2.1 Serviço de Atendimento Emergencial Médico

O Serviço de Emergência Médico (SEM) pode ser definido como “um sistema abrangente que fornece o arranjo de pessoal, instalações e equipamentos para a prestação eficaz, coordenada e pontual de serviços de saúde e segurança às vítimas de doenças ou ferimentos repentinos” [18].

O objetivo do SEM concentra-se em fornecer atendimento pontual às vítimas de lesões ou emergências repentinas e com risco de vida, a fim de evitar mortalidade desnecessária ou morbidade a longo prazo. A função do SEM pode ser simplificada em quatro componentes principais: acesso ao atendimento de emergência, atendimento comunitário, atendimento em trânsito e atendimento até o momento de chegada ao estabelecimento de saúde [21].

Quase sempre cabe ao serviço público assumir a responsabilidade do atendimento às vítimas, principalmente nos casos graves que necessitam, além do meio de transporte, cuidados hospitalares especializados, que não são procedimentos rentáveis para serviços privados. Por este motivo, está claro que o atendimento médico de urgência se torna a imagem mais visível da saúde pública de um país. Permitir que a população tenha um socorro de qualidade é um ponto fundamental que todo governo deve se preocupar [24].

O Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU) é o serviço de emergência médico fornecido pelo setor público no Brasil. Para cada cidade ou região composta por cidades é alocado o sistema do SAMU, de forma que este é acionado a partir de uma central telefônica de chamados. O sistema é constituído por equipes de socorristas, ambulâncias com equipamentos de suporte básico de vida e uma ou mais bases hospitalares.

2.2 SAMU no Brasil

O serviço de atendimento móvel de urgência no Brasil (SAMU 192) segue o modelo francês de tratamento pré-hospitalar, que presta socorro às vítimas no local do acidente, não se atendo somente ao transporte da vítima para o hospital. Lançado em setembro de 2003 pelo Governo Federal, está disponível 24 horas por dia, sendo constituído por equipes de profissionais da saúde que incluem médicos, enfermeiras e assistentes, que respondem a emergências de diferentes naturezas, incluindo trauma, pediátrica, cirúrgica, ginecológica, obstétrica e saúde mental [25].

Segundo [1], o primeiro SAMU implantado no Brasil foi na cidade de Campinas, através do médico coordenador José Roberto Hansen. Na cidade, o SAMU atendeu em 2005 um total de 64.131 ocorrências, divididas em 21.722 com envio de ambulância do SAMU e 42.409 com triagem médica para envio de transporte.

De acordo com [3], o SAMU 192 está presente, atualmente, em 3.618 municípios, com 3.274 ambulâncias. O país conta ainda com 252 motolâncias, 12 embarcações (ambulancha), 14 aeromédicos e 191 Centrais de Regulação. Ao todo, 174 milhões de pessoas (83,69% da população) contam com a cobertura do serviço.

O Ministério da Saúde vem concentrando esforços no sentido de implementar a Política Nacional de Atenção às Urgências, da qual o SAMU 192 é componente fundamental. Tal política prioriza os princípios do SUS (Sistema Único de Saúde), com ênfase na construção de redes de atenção integral às urgências regionalizadas e hierarquizadas que permitam a organização da atenção, com o objetivo de garantir a universalidade do acesso, a equidade na alocação de recursos e a integralidade na atenção prestada [4].

Ainda segundo [4], o SAMU 192 inicia o atendimento a partir do chamado telefônico, quando são prestadas orientações sobre as primeiras ações. A ligação é gratuita, para telefones fixo e móvel. O serviço pode ser solicitado nos seguintes casos:

- problemas cardio-respiratórios;
- intoxicação exógena e envenenamento;
- queimaduras graves;

- maus tratos;
- trabalhos de parto em que haja risco de morte da mãe ou do feto;
- tentativas de suicídio;
- crises hipertensivas e dores no peito de aparecimento súbito;
- acidentes/traumas com vítimas;
- afogamentos;
- choque elétrico;
- acidentes com produtos perigosos;
- suspeita de infarto ou AVC;
- agressão por arma de fogo ou arma branca;
- soterramento, desabamento;
- crises convulsivas;
- transferência inter-hospitalar de doentes graves;
- outras situações consideradas de urgência ou emergência, com risco de morte, seqüela ou sofrimento intenso.

2.3 Problemas associados aos serviços de atendimento emergencial

2.3.1 Número de servidores em uma região

Dependendo da extensão da cidade ou região e seu número de habitantes, um número ideal de unidades de atendimento pode ser determinado. A definição desse número é importante para evitar a alocação exagerada de recursos para tal serviço, assim como para estipular um número mínimo que garanta a eficiência do sistema.

Um dos métodos para determinar o número de servidores é o método da raiz quadrada. [15, 14] mostram que a distância média percorrida em uma viagem dentro de uma região é inversamente proporcional à raiz quadrada do número de unidades da região. A constante de proporcionalidade depende da configuração do tráfego local e localização da unidade, e pode ser determinada por ferramentas geográficas ou simulação.

Devido à natureza estocástica das ocorrências, modelos analíticos de filas podem ser aplicados ao sistema. Um exemplo de aplicação da teoria é o de [6], que representaram um sistema emergencial de saúde a partir do modelo $M/G/\infty$, determinando o número de ambulâncias necessárias para atender à demanda, considerando que a probabilidade de se encontrar todas as ambulâncias ocupadas é menor ou igual à soma das probabilidades de se encontrar cada veículo particular ocupado.

2.3.2 Programação de equipes

Parte crucial do sistema de atendimento de emergência é a organização e programação das equipes. O subsídio dado pelo setor público para a aquisição de equipamentos e contratação de pessoal deve ser adequado à demanda da região em que o sistema se insere. O problema é que alguns países apresentam escassez de recursos para realizar tal subsídio, portanto o estudo sobre a programação de equipes é importante para que não se aloquem recursos excessivos.

2.3.3 Problemas de localização

A determinação dos pontos onde estarão localizados os servidores (unidades de atendimento) é o objetivo geral dos problemas de localização. A definição dessa localização é objeto de estudo de muitos pesquisadores há décadas, os quais aplicam diferentes metodologias para chegar ao modelo mais adequado para esse tipo de problema.

Os modelos de localização são divididos em duas grandes categorias: modelos determinísticos e modelos probabilísticos. A primeira categoria tem como objetivo determinar as localizações ótimas para os servidores, sem se preocupar com a probabilidade de o servidor estar disponível ou não na hora do chamado. A segunda categoria considera o

caráter estocástico do problema, localizando as unidades de serviço de forma a otimizar determinada medida de desempenho [24]. O capítulo 3 trata dos modelos aplicados na literatura, além de explicar com maiores detalhes o modelo a ser utilizado neste trabalho.

Capítulo 3

Modelos de Localização

3.1 Modelos determinísticos

Os modelos determinísticos têm como objetivo determinar a localização ótima para as unidades de serviço, sem considerar a disponibilidade dessas unidades a uma ocorrência. Em qualquer problema de otimização, o modelo matemático utilizado se inicia com a definição de uma função objetivo, que deve ser minimizada ou maximizada para que a solução ótima seja encontrada. No caso dos modelos determinísticos de localização, independentemente do método adotado, a principal variável para se chegar à solução ótima é o tempo de viagem que, para os sistemas de atendimento de emergência, se resume ao tempo de resposta.

Definida a variável de interesse, cada estudo adota uma linha de raciocínio para chegar à solução ótima desejada. Na literatura, duas vertentes foram mais exploradas: método de *p*-medianas e problemas de *cobertura de conjuntos*.

No método de *p*-medianas, a variável a ser minimizada é o tempo médio de resposta. O objetivo desse método é localizar um número invariável *p* de servidores, minimizando a distância média (interpretada, aqui, como o próprio tempo médio de resposta) desses servidores aos pontos geradores de demanda pelo serviço [24].

Existe um considerável número de estudos sobre o método de *p*-medianas na literatura. Em [8], os autores utilizam o método para determinar a localização de sensores em redes municipais de distribuição de água, com o objetivo de minimizar o impacto da con-

taminação da água municipal. Eles utilizaram o modelo analítico para que as unidades de atendimento reajam rapidamente a possíveis emergências, como contaminação acidental ou ataques terroristas às redes, os quais são casos ameaçadores à saúde pública.

Em [22], o estudo se baseou no desenvolvimento do método de *p-medianas* para alocar bases do corpo de bombeiros na cidade de Barcelona. O método também foi utilizado em [20], com um modelo de otimização para alocar recursos SAR (*Search And Rescue*) com o objetivo de interceptar incidentes marítimos mais rapidamente.

É importante salientar que há um inconveniente ao utilizar o método de *p-medianas*. Ao minimizar a distância média dos servidores aos centros de demanda de ocorrências, provavelmente existirão pontos da região considerada que serão atendidos em um tempo de resposta acima do ideal. Nesse contexto, uma alternativa é aplicar o problema de *cobertura de conjuntos*.

Assim como o primeiro método explanado, o problema de cobertura de conjuntos visa prover cobertura às áreas de demanda. Porém, segundo [9], nesse caso a noção de cobertura se refere à determinação de uma distância de serviço, que é a distância crítica além da qual a área de demanda pode ser considerada não coberta. A área de demanda é considerada coberta se pelo menos um servidor está a uma distância menor que a distância crítica. Aqui, mais uma vez interpreta-se “distância” como tempo de resposta.

Dessa forma, o problema passa a ser a minimização do número de servidores para determinada área de demanda, ou ainda, a maximização de uma área de demanda para um número pré-determinado de servidores (Problema de Localização de Máxima Cobertura, PLMC). De acordo com [13], em sistemas de atendimento de emergência e instalações de saúde é importante desenvolver um plano de localização que permita servir um número máximo de pessoas, considerando recursos limitados em mão.

Em [19], pesquisadores estudaram o problema de se determinar locais para entregar medicamentos em uma grande cidade sob um possível ataque bioterrorista. Eles desenvolveram um caso especial de PLMC que considera uma cobertura dependente da distância e uma demanda incerta, aplicando o modelo a um cenário de possível ataque à cidade de Los Angeles. Em outro estudo [23], utilizaram o modelo para localizar instalações de

saúde na cidade de Selangor, Malásia. A abordagem foi a proposição de um algoritmo genético que analisa a proporção de cobertura das instalações dentro de uma distância permitida especificada.

3.2 Modelos probabilísticos

A grande desvantagem dos modelos determinísticos é que se considera que os servidores estão sempre disponíveis quando solicitados, não tendo, na maioria das vezes, aplicações práticas em situações reais. A indisponibilidade de um servidor quando solicitado, em situações de congestionamento, levou estudiosos a desenvolver modelos probabilísticos [9].

Uma variedade de modelos foi proposta para os SEM e problemas de localização de ambulância em cenários estocásticos. Eles diferem na forma de lidar com algumas questões importantes, como cobertura espacial e temporal, administração de congestionamento, preparação para desastres, maximização da disponibilidade de veículos, minimização de custos, etc. Algumas recomendações típicas fornecidas pelos diferentes modelos são os números, localizações, tipos e capacidades das bases dos veículos. Apenas mais recentemente a questão da realocação e encaminhamento dos veículos de emergência foi abordada [11].

Encontram-se na literatura muitos modelos probabilísticos que são extensão de clássicos problemas de localização determinísticos, com a adição do foco no congestionamento dos servidores. O Problema de Localização de Máxima Cobertura Esperada (PLMCE), desenvolvido em [10], incorpora considerações estocásticas ao PLMC, citado anteriormente. Nele é elaborado um exemplo que ilustra a sensibilidade da escolha da localização dos servidores à probabilidade de um deles estar inoperante. O exemplo também demonstra que localizar mais de um servidor em um nó (centro de demanda) pode ser uma solução ótima para o PLMCE, porém nunca é ótimo para o tradicional PLMC.

Em [5], foram propostos termos corretivos para lidar com situações mais reais. O estudo foi feito de forma a não considerar premissas de operações independentes entre servidores, mesmas probabilidades de ocupação entre servidores e probabilidades de ocu-

pação invariantes dependendo de suas localizações, todas suposições feitas pelo PLMCE descrito por [10]. Há ainda artigos, como em [7], que trataram não só da aleatoriedade da disponibilidade dos servidores, mas também reconheceram a natureza estocástica do processo de demanda.

Com a evolução dos estudos, novos aspectos puderam ser tratados. A presença de diferentes tipos de servidores, a diferença de prioridade para cada chamado, a presença de funções objetivas conflitantes, entre outros aspectos, trazem maior complexidade aos modelos, porém os tornam mais aplicáveis em problemas reais, tornando-os mais úteis. Nesse contexto se inseriu o Modelo Hipercubo de Filas, inicialmente proposto em [16], que utiliza, dentre outras premissas, a conservação da identidade dos servidores. Segundo [12], esse modelo não se resume à otimização de uma solução para um problema de localização. Ele é uma ferramenta sofisticada de avaliação de desempenho, fornecendo a possibilidade de escolher a melhor alternativa operacional para o sistema de atendimento de emergência.

O modelo hipercubo será explorado mais detalhadamente na seção 3.3, com detalhes sobre as condições de aplicação do método, além de um exemplo para melhor entendimento do problema.

3.3 Modelo Hipercubo de Filas

Esta seção é dedicada à apresentação do *modelo hipercubo de filas*, que foi o modelo utilizado na metodologia deste trabalho. A explicação do modelo está voltada para o objeto de interesse: o serviço de atendimento emergencial médico, representado pelo SAMU, em uma cidade brasileira. O modelo é apresentado aqui de acordo com a tese de doutorado [24], principal referência para seu entendimento e posterior aplicação no cenário escolhido. Dessa forma, serão apresentadas as hipóteses que validam a aplicação do modelo, a descrição do espaço de estados e a solução do sistema de equações que geram as probabilidades de equilíbrio como resposta. Serão expostos, também, os parâmetros de desempenho que compõem a análise de desempenho do SAMU para o cenário que será apresentado posteriormente.

O modelo é baseado na *teoria de filas*, sendo utilizado para sistemas de atendimento

com demanda aleatória espacialmente distribuída em uma região, como é o caso da atuação do SAMU. Essa região é particionada em um número finito de centros de demanda por chamados, denominados *átomos geográficos*. Esses centros recebem chamados de forma independente, distribuídos ao longo do tempo.

Os servidores do sistema (ambulâncias), os quais atendem aos chamados, estão distribuídos na região de análise. Ao receber um chamado, o servidor pode estar fixo em sua base (caso do presente trabalho, geralmente aplicado para ambulâncias) ou em movimento. Cada servidor possui uma ordem de prioridade de atendimento aos átomos, possibilitando que, quando ocupado no momento de um chamado, já haja definição de um servidor (*backup*) para realizar o atendimento.

Na Figura 3.1 há um exemplo de região de atuação de um sistema, com treze átomos e quatro servidores distribuídos em três bases, além da definição das áreas de coberturas primárias para cada servidor.

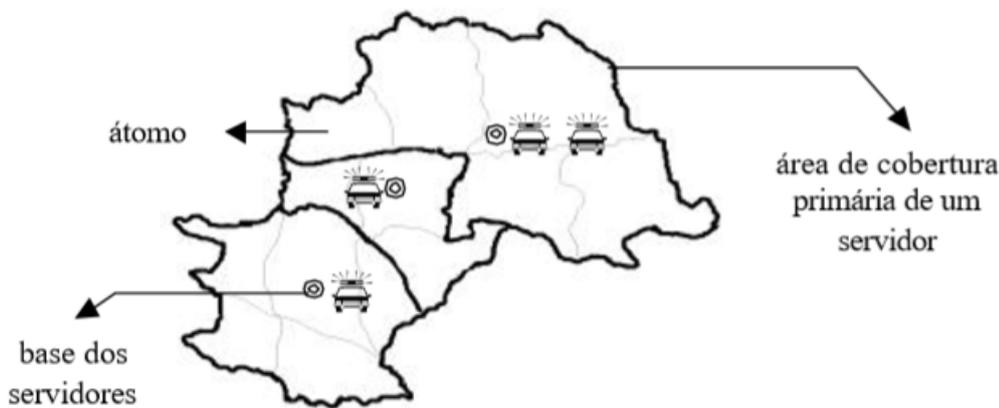


Figura 3.1: Exemplo de região de atuação de um sistema [24]

A ocupação dos servidores é descrita pelo sistema binário. Para um dado momento, se o servidor estiver livre ele é representado pelo número 0, caso esteja ocupado, ele é representado pelo número 1. Dessa forma, um estado momentâneo do sistema é representado por um vetor com dimensão igual ao número N de servidores, ordenados do primeiro ao último, ocupando as posições da direita para a esquerda do vetor. A junção de todos os estados possíveis para os servidores, 2^N , descreve o espaço de estados do sistema.

Como exemplo, tem-se um sistema com três servidores, em um estado (100). Nesse caso, o servidor 1 está livre, o servidor 2 está livre e o servidor 3 está ocupado. O espaço de estados desse sistema, para $N = 3$, está em R^3 , representado por um conjunto de vértices de um cubo de aresta 1, ilustrado na Figura 3.2. Caso o número de servidores seja N , o espaço será N -dimensional e, para $N > 3$, será representado por um conjunto de vértices de um *hipercubo*, inspiração para o nome do modelo.

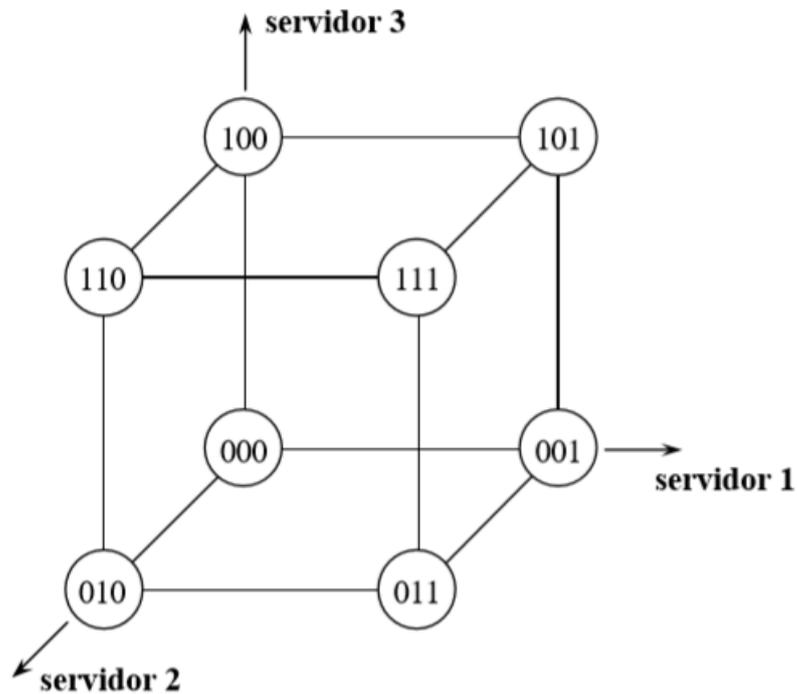


Figura 3.2: Espaço de estados para $N=3$ servidores [24]

No caso de todos os servidores estarem ocupados para um determinado momento, o estado será (11...1). Caso o sistema receba um chamado nesse estado, pode ser adicionada uma cauda junto a ele, representando os usuários da fila formada. As solicitações excedentes são atendidas de acordo com a disciplina *first come first served*, à medida que os servidores terminam seus atendimentos. A permissão da formação de filas, assim como se esta será limitada ou não, fica a critério do aplicador do modelo, de acordo com as exigências do sistema no qual o modelo será aplicado.

3.3.1 Hipóteses do modelo hipercubo

Segundo [17], existem nove hipóteses que devem ser verificadas para se aplicar o modelo hipercubo de filas.

1. *Átomos geográficos*: A região de operação do sistema é particionada em N_A átomos geográficos, cada um representando uma fonte independente de solicitações pelo serviço. Qualquer átomo é atendido por pelo menos um servidor do sistema.
2. *Processos de chegada Poissonianas independentes*: Os chamados de cada átomo j chegam de forma independente conforme um processo de *Poisson*, com taxas médias λ_j ($j = 1, 2, \dots, N_A$) constantes no tempo e de determinação ou estimativa possíveis.
3. *Tempos de viagem entre átomos*: os tempos médios de viagem τ_{ij} entre os átomos i e j ($i, j = 1, 2, \dots, N_A$) devem ser conhecidos ou estimados pelos conceitos de probabilidade geométrica
4. *Servidores*: Existem N servidores distribuídos pela região de análise, que podem se deslocar e atender qualquer um dos átomos.
5. *Localização dos servidores*: A localização dos servidores, caso disponíveis, deve ser conhecida. Para servidores fixos, que é a situação das ambulâncias em um sistema de atendimento médico, sua localização é a base.
6. *Despacho de um servidor*: Somente um servidor é despachado para atender cada serviço solicitado. Caso não haja servidor disponível para realizar o atendimento, o chamado poderá entrar em uma fila (em sistemas que permitem formação de filas) ou o chamado é perdido (em sistemas que não permitem formação de filas).
7. *Política de despacho de servidores*: Uma lista fixa de preferências de despacho para cada átomo é previamente determinada. Caso o primeiro servidor dessa lista esteja disponível, ele é despachado para atender o chamado. Caso contrário, o próximo servidor disponível da lista é despachado (*backup*). A lista de preferência permanece inalterada durante a operação do sistema.

8. *Tempos de atendimento*: O tempo total de atendimento (ou serviço) de um chamado inclui o tempo de preparo do servidor (*setup time*), o tempo de viagem do servidor até o local da ocorrência, o tempo de execução do serviço propriamente dito (em cena) e o tempo de retorno à base. Os servidores podem possuir taxas médias de atendimento μ_n distintas, para cada servidor $n = 1, 2, \dots, N$. Se o sistema permitir formação de filas, o modelo se torna mais eficiente à medida que os tempos médios aproximam-se dos respectivos desvios-padrão, ou seja, tempos de atendimento exponencialmente distribuídos.

9. *Dependência do tempo de atendimento em relação ao tempo de viagem*: Variações no tempo de atendimento devidas às variações no tempo de viagem são assumidas como sendo de segunda ordem, quando comparadas às variações dos tempos em cena e/ou *setup*. (Isso não significa que o tempo de viagem deva ser ignorado ao se computar o tempo total de atendimento).

3.3.2 Transições entre estados

Para a formulação das equações de equilíbrio entre os possíveis estados, admite-se um processo idêntico aos modelos clássicos de filas. Apenas um servidor pode ser despachado por vez, e são nulas as probabilidades de dois chamados serem realizados simultaneamente ou dois atendimentos terminarem ao mesmo tempo. Essas características estão de acordo com os processos Markovianos.

As taxas de transição entre estados adjacentes podem ser ascendentes ou descendentes. As taxas ascendentes, por exemplo, são determinadas pela soma da taxa de chegada de chamados do átomo preferencial de um determinado servidor, que passa a estar ocupado, com a taxa de chegada de chamados dos átomos os quais esse mesmo servidor não é o preferencial (é, portanto, o *backup*), em situações em que o servidor preferencial dos átomos está indisponível. As taxas descendentes estão relacionadas às taxas de atendimento, de forma análoga à descrita.

3.3.3 Equações de equilíbrio

As equações de equilíbrio entre estados são determinadas a partir da suposição de que o sistema deve atingir o equilíbrio. Assim, para um estado qualquer do sistema, o fluxo com que se entra nesse estado deve ser igual ao fluxo com que se sai desse estado.

Seja S_i o estado do sistema. Para $i = 1, 2, \dots, N$, com N representando o número de servidores, S_i corresponde ao estado com i usuários ocupados. Para $i > N$, S_i representa o estado em que todos os servidores estão ocupados, e há $i - N$ usuários na fila. Para melhor compreensão do modelo, serão desenvolvidas as equações do estado S_1 e serão apresentadas as equações dos outros estados, para um sistema com $N_A = 3$ átomos e $N = 3$ servidores, sendo os servidores 1, 2 e 3 primários para os átomos 1, 2 e 3, respectivamente.

1. S_0 : sistema vazio - (000)

Partindo do estado (000), a transição para os estados (001), (010) e (100) é realizada a partir da chegada de um chamado de qualquer átomo. Assim, a taxa de transição de (000) para outros estados é $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3$.

Partindo de outros estados, a transição para o estado (000) pode ser realizada de três maneiras: partindo do estado (001) com a conclusão do atendimento pelo servidor 1 (μ_1); partindo do estado (010) com a conclusão do atendimento pelo servidor 2 (μ_2); partindo do estado (100) com a conclusão do atendimento pelo servidor 3 (μ_3).

Dessa forma, a equação de equilíbrio para o estado (000) é:

$$\lambda \cdot p_{000} = \mu_1 \cdot p_{001} + \mu_2 \cdot p_{010} + \mu_3 \cdot p_{100} \quad (3.1)$$

onde p_B é a probabilidade de equilíbrio do estado B (por exemplo, p_{000} é a probabilidade de equilíbrio do estado $B = (000)$)

2. S_1 : 1 servidor ocupado - (001), (010) e (100)

Partindo do estado (001), a transição para os estados (011) e (101) é realizada a partir da chegada de um chamado de qualquer átomo, e a transição para o estado

(000) é realizada a partir da conclusão do atendimento do servidor 1. Assim, a taxa de transição de (001) para outros estados é $\lambda + \mu_1$.

A partir de outros estados, a transição para o estado (001) pode ser realizada de três maneiras: partindo do estado (000) com a chegada de um chamado com origem no átomo 1; partindo do estado (011) com a conclusão do atendimento do servidor 2; partindo do estado (101) com a conclusão do atendimento do servidor 3.

Dessa forma, a equação de equilíbrio do estado (001) é:

$$(\lambda + \mu_1) \cdot p_{001} = \lambda_1 \cdot p_{000} + \mu_2 \cdot p_{011} + \mu_3 \cdot p_{101} \quad (3.2)$$

Analogamente, para os estados (010) e (100) são construídas as seguintes equações:

$$(010) : (\lambda + \mu_2) \cdot p_{010} = \lambda_2 \cdot p_{000} + \mu_1 \cdot p_{011} + \mu_3 \cdot p_{110} \quad (3.3)$$

$$(100) : (\lambda + \mu_3) \cdot p_{100} = \lambda_3 \cdot p_{000} + \mu_1 \cdot p_{101} + \mu_2 \cdot p_{110} \quad (3.4)$$

3. S₂: 2 servidores ocupados - (011), (101) e (110)

Partindo do estado (011), a transição para o estado (111) é realizada pela chegada de um chamado de qualquer átomo, e a transição para os estados (001) e (010) são realizadas a partir da conclusão do atendimento dos servidores 2 e 1, respectivamente. Portanto, a taxa de transição do estado (011) para outros estados é $\lambda + \mu_2 + \mu_1$.

A partir de outros estados, existem quatro maneiras de se chegar ao estado (011): partindo do estado (001), com a chegada de um chamado do átomo 2; partindo do estado (001), com a chegada de um chamado do átomo 1, despachando-se o servidor 2 (primeiro *backup*); partindo do estado (010), com a chegada de um chamado do átomo 1; partindo do estado (111), com a conclusão do atendimento do servidor 3.

Dessa forma, a equação de equilíbrio para o estado (011) é dada por:

$$(011) : (\lambda + \mu_2 + \mu_1) \cdot p_{011} = (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot p_{001} + \lambda_1 \cdot p_{010} + \mu_3 \cdot p_{111} \quad (3.5)$$

Analogamente, para os estados (101) e (110), tem-se:

$$(101) : (\lambda + \mu_3 + \mu_1) \cdot p_{101} = (\lambda_1 + \lambda_3) \cdot p_{100} + \lambda_3 \cdot p_{001} + \mu_2 \cdot p_{111} \quad (3.6)$$

$$(110) : (\lambda + \mu_2 + \mu_3) \cdot p_{110} = (\lambda_3 + \lambda_2) \cdot p_{010} + \lambda_2 \cdot p_{100} + \mu_1 \cdot p_{111} \quad (3.7)$$

4. S₃: todos os servidores ocupados - (111)

Partindo do estado (111), qualquer chegada ou conclusão de atendimento provocará a transição de estado, ou seja, $\lambda + \mu$.

A partir de outros estados, pode-se chegar ao estado (111) a partir dos estados com dois servidores ocupados, com a chegada de um chamado de qualquer átomo. Pode-se, também, chegar ao estado (111) a partir do estado S₄, com a conclusão do atendimento de qualquer servidor.

Assim, a equação de equilíbrio para o estado (111) é:

$$(\lambda + \mu) \cdot p_{111} = \lambda \cdot p_{011} + \lambda \cdot p_{101} + \lambda \cdot p_{110} + \mu \cdot p_4$$

Aqui, respeitam-se as condições de equilíbrio do sistema, que exigem que as taxas de transição entre os estados (111) e S₄ sejam iguais, ou seja, $\lambda \cdot p_{111} = \mu \cdot p_4$, onde p_4 é a probabilidade de equilíbrio do estado S₄ e $\mu = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3$. Dessa forma:

$$\mu \cdot p_{111} = \lambda \cdot p_{011} + \lambda \cdot p_{101} + \lambda \cdot p_{110} \quad (3.8)$$

Como pode-se observar, as equações de 3.1 a 3.8 representam um sistema linear finito de equações, em relação às variáveis p_{000} , p_{001} , p_{010} , p_{100} , p_{011} , p_{101} , p_{110} , p_{111} . Esse sistema, resolvido através da forma matricial $A \cdot x = b$, apresenta $b = 0$, resultando em um sistema

homogêneo, com solução trivial $p_{ijk} = 0$, para todo $i, j, k = 0, 1$. Além disso, o sistema é possível indeterminado.

Para se retirar a indeterminação do sistema e fazê-lo não homogêneo, a ideia é encontrar uma equação de normalização, desenvolvendo-a para que possa ser inserida no sistema, no lugar de uma das equações de 3.1 a 3.8. Considerando que a soma das probabilidades de todos os estados possíveis do sistema é igual a 1, tem-se:

$$p_{000} + p_{001} + p_{010} + \dots + p_{111} + p_4 + p_5 + \dots = 1 \quad (3.9)$$

O lado esquerdo da equação 3.9 pode ter um número infinito de termos, caso o sistema em questão permita uma fila infinita, ou pode ter um número finito de termos, caso a fila seja limitada ou não permitida. Essa equação pode ser simplificada em qualquer um dos casos. Na metodologia deste trabalho, o sistema permitirá uma fila limitada em 3 usuários, e contará com $N_A = 6$ átomos e $N = 3$ servidores, portanto a simplificação será aqui exposta para esse caso particular.

Partindo-se da hipótese de que $\lambda \cdot p_{111} = \mu \cdot p_4$, e sendo $\rho = \frac{\lambda}{\mu}$, com $\rho < 1$, tem-se $p_4 = \rho \cdot p_{111}$. Utilizando a mesma lógica para os estados S_5 e S_6 tem-se que $p_5 = \rho^2 \cdot p_{111}$ e $p_6 = \rho^3 \cdot p_{111}$. Portanto a equação 3.9 pode ser reescrita como:

$$p_{000} + p_{001} + p_{010} + \dots + \sum_{n=0}^3 \rho^n \cdot p_{111} = 1 \quad (3.10)$$

Substituindo qualquer uma das equações de 3.1 a 3.8 pela equação 3.10, o sistema de equações do modelo hipercubo de filas passa a ser possível determinado, bastando aplicar algum método de resolução de sistemas para se chegar à sua solução. Dependendo do número de átomos, número de servidores e da complexidade do sistema, a solução pode ser trabalhosa e resolvida apenas computacionalmente, por método iterativo, por exemplo. Ainda assim, há a possibilidade do método iterativo não convergir, dificultando a aplicação do modelo para alguns sistemas.

3.3.4 Medidas de desempenho do sistema

Após a resolução do sistema de equações proposto, analisa-se o sistema a partir de medidas de desempenho. Essas medidas podem trazer resultados de eficiência em nível de servidor, átomo ou para o sistema geral. No presente trabalho são apresentados três conjuntos de medidas de desempenho: *workload*, frequência de despachos e tempos médios de viagem.

3.3.4.1 *Workload*

Workload é a carga de trabalho de um servidor, representada por ρ_n . Ela pode ser entendida como a fração de tempo que o servidor n permanece ocupado, ou seja, se dá pela soma das probabilidades dos estados em que esse servidor está ocupado. Dessa forma, continuando com a formulação das equações para $N_A = 3$ átomos e $N = 3$ servidores, tem-se:

$$\begin{cases} \rho_1 = p_{001} + p_{101} + p_{011} + p_{111} + p_Q \\ \rho_2 = p_{010} + p_{110} + p_{011} + p_{111} + p_Q \\ \rho_3 = p_{100} + p_{110} + p_{101} + p_{111} + p_Q \end{cases} \quad (3.11)$$

onde $p_Q = p_4 + p_5 + p_6 + \dots$ é a probabilidade de existência de fila no sistema.

3.3.4.2 Frequência de despachos

A frequência de despachos é a fração de todos os despachos do servidor n ao átomo j , f_{nj} . Ela é dada pela seguinte equação:

$$f_{nj} = f_{nj}^{[1]} + f_{nj}^{[2]} = \frac{\lambda_j}{\lambda} \sum_{B \in E_{nj}} p_B + \frac{\lambda_j}{\lambda} p_S \frac{\mu_n}{\mu} \quad (3.12)$$

onde E_{nj} é o conjunto dos estados nos quais um chamado do átomo j é atendido pelo servidor n , e $p_S = p_Q + p_{111}$ é a probabilidade de saturação do sistema. $f_{nj}^{[1]}$ corresponde à fração de todos os despachos do servidor n para o átomo j que não incorrem em qualquer tempo de espera em fila, enquanto $f_{nj}^{[2]}$ corresponde à fração de todos os despachos do

servidor n para o átomo j que incorrem em algum tempo de espera em fila.

3.3.4.3 Tempos médios de viagem

Os tempos médios de viagem são calculados a partir de uma matriz origem-destino, constituída pelos tempos de viagem τ_{ij} . Esses tempos representam o tempo gasto por um servidor para se deslocar do átomo j ao átomo i , e podem ser medidos ou estimados.

Para calcular o **tempo médio de viagem do sistema** T , é necessário determinar a matriz de localizações dos servidores, o tempo médio necessário para um servidor n , quando disponível, viajar até o átomo j , e o tempo médio de espera de um chamado que está em fila.

A matriz de localizações é dada por $L = [l_{nj}]$, onde os elementos da matriz representam a probabilidade de um servidor estar localizado em um determinado átomo, quando disponível. Os elementos l_{nj} são binários, valendo 1 caso o servidor esteja localizado no átomo j , e valendo 0 nos demais casos. Já o tempo médio de viagem para um servidor deslocar-se até determinado átomo é dado por:

$$t_{nj} = \sum_{k=1}^{N_A} l_{nk} \cdot \tau_{kj} \quad (3.13)$$

com $n = 1, 2, \dots, N$ e $j = 1, 2, \dots, N_A$. O tempo médio de espera para chamados em fila é dado pela equação:

$$T_Q = \sum_{i=1}^{N_A} \sum_{j=1}^{N_A} \frac{\lambda_i \cdot \lambda_j}{\lambda^2} \cdot \tau_{ij} \quad (3.14)$$

Assim, o tempo médio de viagem do sistema é obtido pela fórmula:

$$T = \sum_{n=1}^N \sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[1]} \cdot t_{nj} + p_S \cdot T_Q \quad (3.15)$$

Para calcular o **tempo médio de viagem para cada átomo** T_j , pode-se aplicar a seguinte equação:

$$T_j = \frac{\sum_{n=1}^N f_{nj}^{[1]} \cdot t_{nj}}{\sum_{n=1}^N f_{nj}^{[1]}} \cdot (1 - p_S) + \sum_{i=1}^{N_A} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda} \right) \cdot \tau_{ij} \cdot p_S \quad (3.16)$$

Por fim, o cálculo do **tempo médio de viagem para cada servidor** TU_n é:

$$TU_n = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[1]} \cdot t_{nj} + \left(\frac{T_Q \cdot p_S}{N} \right)}{\sum_{j=1}^{N_A} f_{nj}^{[1]} + \left(\frac{p_S}{N} \right)} \quad (3.17)$$

Os tempos médios de viagem do sistema, átomos e servidores são as medidas de desempenho que futuramente serão comparados aos tempos médios de resposta (TR) do sistema real.

Capítulo 4

Cenário e Base de Dados

Este capítulo é dedicado à caracterização do cenário escolhido, bem como tratamento da base de dados a ser utilizada para aplicação do modelo descrito.

4.1 Cenário escolhido

O cenário escolhido para aplicação do modelo hipercubo de filas foi a cidade de Bagé, Rio Grande do Sul. Segundo [2], a cidade conta com uma população estimada de 121.143 habitantes e uma área total de 4.090,36 km². A cidade é considerada de médio porte e, apesar de não possuir grande população, é um cenário válido para aplicação do modelo. Na Figura 4.1 a localização de Bagé no Rio Grande do Sul é indicada, e na Figura 4.2 ilustra-se o mapa geral da cidade.



Figura 4.1: Localização de Bagé no Rio Grande do Sul

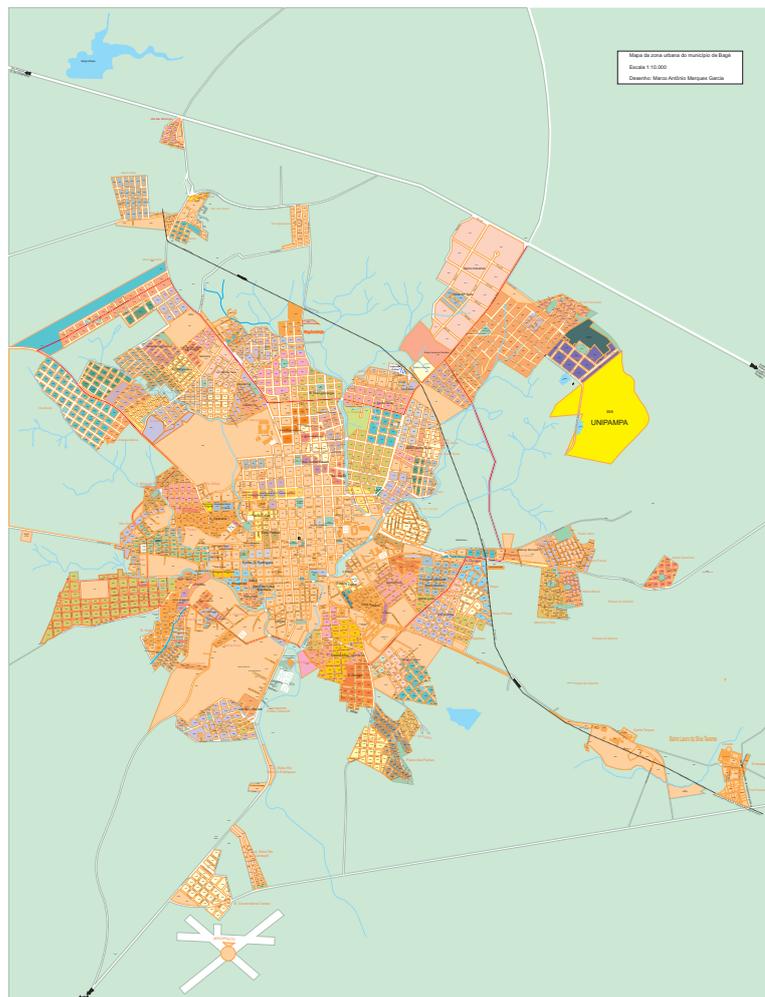


Figura 4.2: Mapa geral de Bagé

O SAMU de Bagé foi inaugurado em 2005 e, desde então, a maioria das ocorrências médicas correspondem a casos clínicos. Atualmente, o serviço de atendimento emergencial da cidade conta com um VSA (veículo de suporte avançado) e dois VSB's (veículo de suporte básico).

Os VSB's são responsáveis por atender à maioria dos chamados de emergência. Eles possuem equipamentos básicos para o atendimento domiciliar de urgência, como imobilizadores, oxigênio, aspiradores e medicamentos básicos. Esses veículos realizam atendimentos com certo grau de gravidade clínica e traumática, como é o caso de acidentes

[24].

Já os VSA's são mais aprimorados que os veículos básicos no que diz respeito a equipamentos de bordo e equipe acompanhante. Eles são veículos do tipo UTI (unidade de tratamento intensivo), realizando atendimentos mais complexos, não só de ordem clínica, mas também alguns procedimentos cirúrgicos [24].

No caso de uma ocorrência, a equipe médica avalia o grau de complexidade do chamado, definindo qual veículo deve realizar o atendimento. Definido o veículo (servidor), este se desloca até o ponto de ocorrência, realiza o procedimento adequado no local e leva o paciente para alguma unidade de saúde. Para a cidade de Bagé, o SAMU fica localizado no principal hospital da cidade, denominado Santa Casa de Caridade. Dessa forma, quando há um chamado, a ambulância parte dessa base, chega ao local da ocorrência e depois desloca o paciente até uma das unidades de saúde da cidade como, por exemplo, a UPA (Unidade de Pronto Atendimento). Na Figura 4.3, estão indicadas a base e uma das unidades médicas a qual comumente é destinado o paciente.

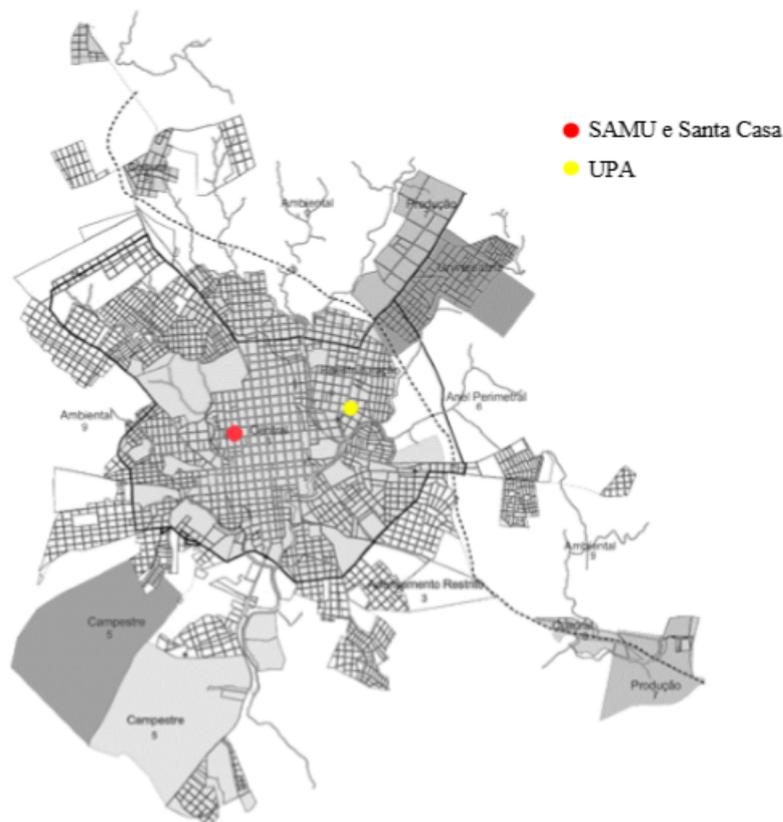


Figura 4.3: Localização da base do SAMU e UPA na cidade de Bagé

4.2 Tratamento da base de dados do SAMU de Bagé

Apesar de ter sido inaugurado em 2005, apenas a partir de 2011 o SAMU de Bagé passou a ter seus dados de ocorrências registrados eletronicamente. Para o presente trabalho, foi disponibilizada uma base de dados de ocorrências de 2011 a 2015.

A base do SAMU apresenta diversas informações, porém apenas parte delas foram aproveitadas. Da tabela disponibilizada, os seguintes campos foram utilizados:

- Chamado: número de identificação da ocorrência;
- Data: data da ocorrência;
- Bairro: bairro no qual houve a ocorrência;
- Chamado GPS LAT: latitude do local da ocorrência;
- Chamado GPS LOG: longitude do local da ocorrência;
- Tipo Equipe: tipo da equipe que atendeu ao chamado (avançada ou básica);
- Equipe: código da viatura que atendeu ao chamado;
- Deslocar: horário do chamado;
- Partida Deslocando: horário em que a viatura deixa a base em direção à ocorrência;
- Chegada no Local: horário da chegada da viatura no local da ocorrência;
- Evento Seguinte: horário do retorno à base.

A Figura 4.4 apresenta a tabela da base utilizada, com algumas ocorrências e suas informações.

CHAMADO	DATA	BAIRRO	CHAMADO_GPS_LAT	CHAMADO_GPS_LONG	TIPO_EQUIPE	EQUIPE	DESLOCAR	PARTIDA DESLOCANDO	CHEGADA NO LOCAL	EVENTO SEGUINTE
49737	01/01/2013	SANTA CARMEN	-31,33752251	-54,12176895	Basica	S8003	12:49:33	12:51:26	12:56:19	13:12:45
49748	01/01/2013	SAO JUDAS	-31,33157349	-54,08876801	Basica	S8002	14:59:12	14:59:24	15:07:17	15:33:43
49786	01/01/2013	CENTRO	-31,33066559	-54,10439301	Basica	S8003	20:20:23	20:21:15	20:27:18	20:50:07
49789	01/01/2013	KENNEDY	-29,68829536	-51,12461472	Avancada	SA001	20:32:13	20:32:24	20:40:46	21:00:15
49804	01/01/2013	CENTRO	-31,32354736	-54,10670853	Basica	S8003	22:04:05	22:11:56	22:12:09	22:30:20
49817	01/01/2013	CENTRO	-31,3347702	-54,1084137	Basica	S8002	23:46:38	23:49:16	23:49:48	00:02:21
49826	02/01/2013	GETULIO VARGAS	-31,31207085	-54,08724976	Basica	S8002	08:05:42	08:11:04	08:11:07	08:11:13
49853	02/01/2013	SANTA CECILIA	-31,33207512	-54,11733246	Basica	S8003	11:45:20	11:45:55	11:52:35	12:02:36
49867	02/01/2013	CENTRO	-31,32475853	-54,10406876	Basica	S8002	14:29:56	14:32:46	14:37:25	14:52:18
49901	02/01/2013	CENTRO	-31,32895088	-54,10463333	Basica	S8003	18:57:07	18:58:52	19:01:16	19:12:39
49903	02/01/2013	CENTRO	-31,33752251	-54,12176895	Basica	S8002	19:17:42	19:22:10	19:26:46	19:39:52
49904	02/01/2013	GETULIO VARGAS	-31,32537079	-54,09549332	Basica	S8003	19:21:21	19:23:51	19:30:16	19:38:51
49915	02/01/2013	GETULIO VARGAS	-28,24671555	-52,42436981	Basica	S8002	20:13:56	20:14:34	20:19:34	20:33:12
49920	02/01/2013	GETULIO VARGAS	-31,31836891	-54,09310532	Basica	S8002	21:04:35	21:05:23	21:10:39	21:27:36
49922	02/01/2013	SANTA CARMEM	-31,33466148	-54,09037781	Basica	S8002	21:32:51	21:33:34	21:37:47	21:52:04
49932	03/01/2013	CENTRO	-31,32777596	-54,10631561	Basica	S8003	03:57:14	03:59:04	04:01:11	04:12:13
49936	03/01/2013	CENTRO	-31,31814766	-54,10905075	Avancada	SA001	07:58:48	07:59:42	08:01:21	08:16:00
49946	03/01/2013	BONITO	-31,33442116	-54,08011246	Basica	S8002	11:29:51	11:33:43	11:40:59	12:02:55
49947	03/01/2013	CENTRO	-31,32296562	-54,10546112	Basica	S8003	11:31:17	11:33:45	11:35:27	12:02:21
49949	03/01/2013	CENTRO	-31,34038734	-54,10271454	Avancada	SA001	11:36:38	11:37:06	11:42:43	11:52:59

Figura 4.4: Informações da base de dados do SAMU de Bagé

De posse das informações necessárias, definiu-se a extensão da base a ser utilizada. Os anos de 2013 e 2014 apresentam a maior quantidade de ocorrências, totalizando cerca de cerca de 22 mil linhas de dados. Portanto, esses foram os anos considerados para a análise. Além disso, foram consideradas apenas as ocorrências em bairros pertencentes ao município de Bagé.

A partir daí, partiu-se para a retirada das incoerências da base. Foram retiradas todas as linhas que não apresentavam dados de latitude e longitude, informações cruciais para a aplicação do modelo. Foram retiradas, também, linhas que apresentavam latitudes e longitudes incorretas, fora dos limites do município. Os dados de horário também são de extrema importância para a modelagem, portanto linhas que apresentavam horários nulos, ou ainda, linhas que apresentavam horários cronologicamente incorretos, foram desconsiderados.

Restringida a base e retiradas todas as incoerências, restaram cerca de 5.600 linhas de dados. Para obtenção da base final a ser utilizada, adicionaram-se três colunas: TR, TC e TT. TR resulta da subtração entre o horário da **chegada no local** e o horário “**deslocar**”, ou seja, o *tempo de resposta*; TC é o resultado da subtração entre o horário do **evento seguinte** e o horário da **chegada no local**, ou seja, o *tempo em cena*; TT é a soma de TR e TC, ou seja, o *tempo de atendimento*. Assim, a base ficou completa para modelagem e análise.

Capítulo 5

Metodologia

Para aplicação do modelo hipercubo de filas, primeiramente foi feito um estudo sobre as estatísticas gerais do SAMU de Bagé. Conhecidas as distribuições de chamados ao longo tempo e as variáveis gerais do sistema, o modelo pôde ser aplicado.

5.1 Análise estatística do SAMU de Bagé

A análise estatística do SAMU de Bagé se inicia com a distribuição dos chamados ao longo dos dois anos que constituem a base de dados. Como já mencionado, os atendimentos podem ser feitos pelos dois VSB's (básico) ou pelo VSA (avançado), portanto as estatísticas são apresentadas, em geral, separando-se os dois tipos de equipes.

A Figura 5.1 apresenta a distribuição dos chamados nos meses dos anos de 2013 e 2014.

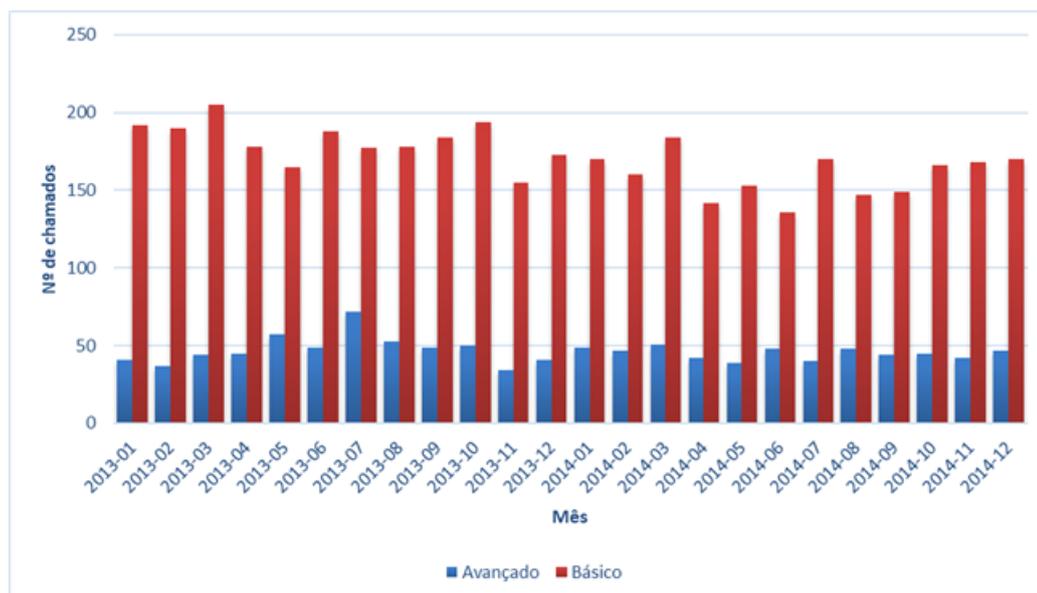


Figura 5.1: Distribuição dos chamados ao longo dos meses

Manipulando a base de dados, pôde-se determinar as variáveis importantes do sistema, que posteriormente servirão para realizar comparações com as medidas de desempenho do modelo. Para o período considerado, determinaram-se as médias dos números de chamados por dia, do intervalo entre chegadas de chamados sucessivos, do tempo de resposta (TR), do tempo em cena (TC) e do tempo total (TT). É importante relembrar que o TR é dado pelo tempo de viagem acrescido do tempo de preparação da equipe.

Os valores das variáveis estão mostrados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Variáveis gerais por equipe do sistema do SAMU de Bagé

	Avançado		Básico	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Chamados por dia	2,0	1,1	5,7	2,8
Intervalo entre chegadas sucessivas (min)	519,6	406,6	242,9	284,2
TR (min)	8,8	6,0	8,9	6,5
TC (min)	21,0	13,9	20,9	33,8
TT (min)	29,8	14,8	29,7	34,2

Com as variáveis gerais do sistema definidas, o passo seguinte foi definir o período de pico do sistema. Esse passo foi realizado para coletar as variáveis no período crítico do sistema, para que, posteriormente, as medidas de desempenho sejam definidas e válidas para qualquer momento, a favor da segurança.

Para isso, foi analisada a distribuição dos chamados em cada hora do dia. A Figura 5.2 apresenta essa distribuição para o período avaliado.

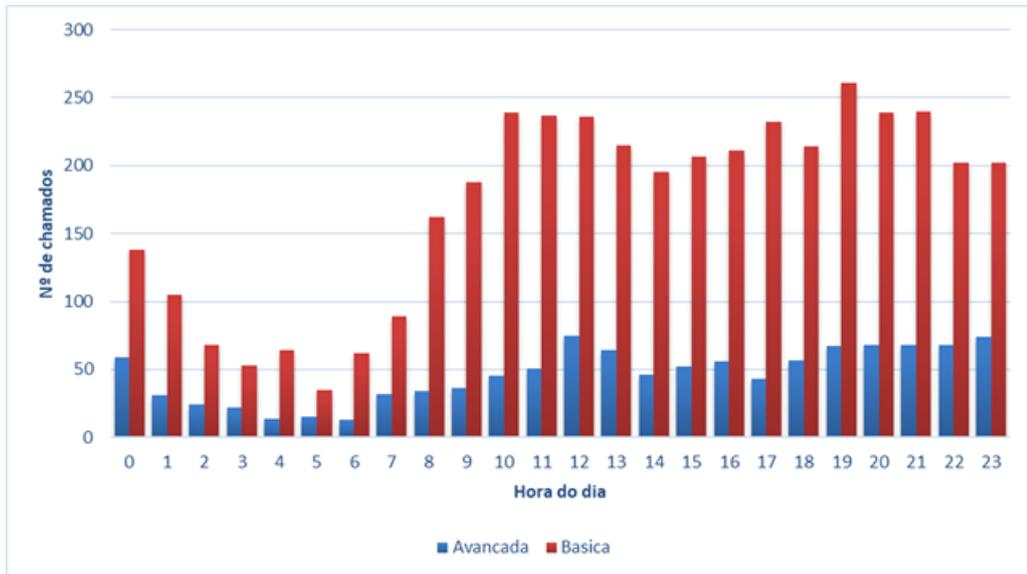


Figura 5.2: Distribuição dos chamados em cada hora do dia

Percebe-se pela Figura 5.2 que a partir das 10 horas da manhã há um período com maior número de chamados, que se estende até o final do dia. Dessa forma, as variáveis gerais foram novamente calculadas, definidas agora para as 14 horas de pico. Os valores das variáveis estão apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Variáveis gerais por equipe do sistema do SAMU de Bagé para o período de pico

	Avançado		Básico	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Chamados por 14h	1,7	0,8	4,5	2,1
Intervalo entre chegadas sucessivas (min)	234,7	166,9	128,3	118,0
Tempo de resposta (min)	8,8	5,1	8,6	5,4
Tempo em cena (min)	21,1	13,2	21,1	41,8
Tempo total (min)	29,9	13,7	29,8	42,0

Ao comparar a Tabela 5.2 com a Tabela 5.1 percebe-se uma leve diminuição na média de chamados, esperada pela redução de um dia para o período de 14h. A principal e mais importante diferença está na diminuição do intervalo entre chegadas sucessivas, o que significa que as taxas médias de chegada de chamados (λ) aumentaram para o período crítico, alteração também esperada.

Com os resultados obtidos para o período de pico, partiu-se para a aplicação do modelo considerando apenas os chamados feitos nas 14 horas críticas do sistema.

5.2 Aplicação do modelo hipercubo para o SAMU de Bagé

Esta seção é dedicada à aplicação do modelo hipercubo de filas para o sistema do SAMU de Bagé. Primeiramente, foram levantados os parâmetros necessários para a modelagem, de acordo com as hipóteses descritas na subseção 3.3.1. De posse dos parâmetros, foram montadas as equações de equilíbrio de estados. Com as equações definidas, pôde-se aplicar um método de resolução do sistema formado, prosseguindo com a análise dos resultados no capítulo 6.

5.2.1 Parâmetros do sistema

Os parâmetros do sistema são necessários tanto para validação das hipóteses do modelo, quanto para posterior aplicação deste.

5.2.1.1 Átomos geográficos

Como explanado anteriormente, a cidade avaliada precisa ser dividida em átomos geográficos, que representam os centros de demanda por chamados. A definição dos átomos foi feita a partir da distribuição espacial das ocorrências na cidade, utilizando as coordenadas geográficas dos chamados para definir *clusters*, que são os próprios centros de demanda.

Para tanto, foi utilizado o algoritmo *k-means* por meio da programação em linguagem *R*. Esse não é o método usual encontrado na literatura para se definirem os átomos geográficos, que são geralmente determinados pela própria divisão regional do município. Entretanto, como a intenção de dividir a região em átomos é criar os centros de demanda, a *clusterização* pode ser considerada um método eficaz para esse objetivo.

Primeiramente, foram mapeados os chamados médicos da cidade de Bagé. A distribuição espacial das ocorrências está apresentada na Figura 5.3.

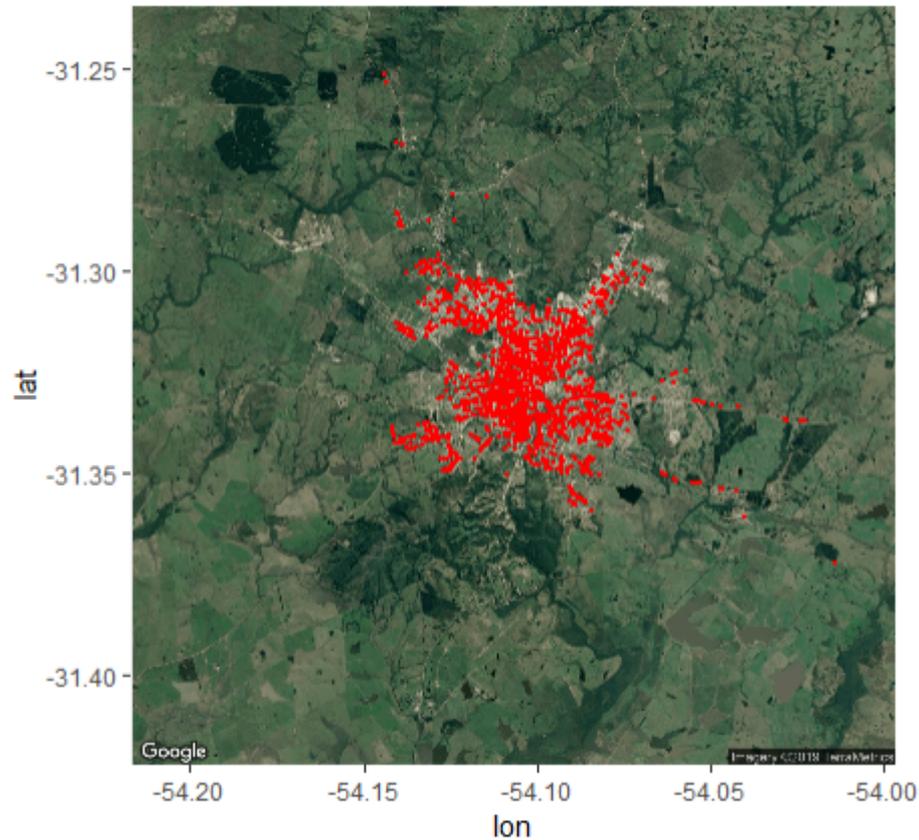


Figura 5.3: Distribuição espacial das ocorrências médicas na cidade de Bagé

Depois, determinaram-se quantos centros de demanda (*clusters*) eram necessários ser definidos. Dada a quantidade relativamente baixa de chamados na cidade, foram definidos três *clusters*. A Figura 5.4 mostra os centros de demanda 1, 2 e 3 gerados.

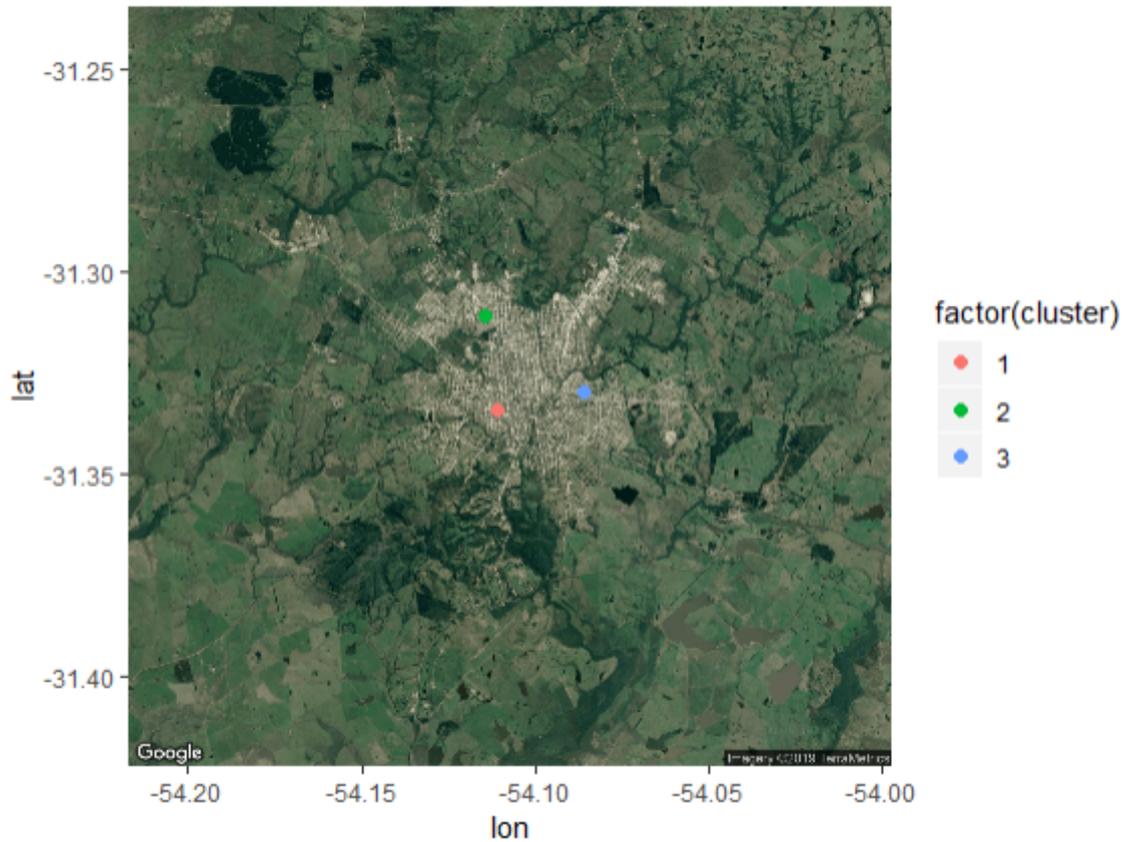


Figura 5.4: Centros de demanda de chamados da cidade de Bagé

Como já mencionado, existem tipos de equipe diferentes no SAMU de Bagé, avançado e básico. Segundo [17], nesse caso, o recomendável é utilizar um processo de camadas, que biparticionam cada centro de demanda em A (avançado) e B (básico). Dessa forma, os átomos geográficos são: 1A, 1B, 2A, 2B, 3A e 3B.

5.2.1.2 Taxas médias de chegadas de chamados

As taxas médias de chegadas são determinadas a partir do intervalo entre chegadas sucessivas. Primeiramente, determinou-se a taxa média de chegadas do sistema. A Tabela 5.3 apresenta os valores das variáveis gerais para o horário de pico, sem separá-los por tipo de equipe.

Tabela 5.3: Variáveis gerais do sistema do SAMU de Bagé para o período de pico

	Média	Desvio-padrão
Chamados por 14h	5,5	2,5
Intervalo entre chegadas sucessivas (min)	108,2	106,6
Tempo de resposta (min)	8,6	5,5
Tempo em cena (min)	21,1	36,7
Tempo total (min)	29,8	36,9
Taxa média de chegadas (λ)		0,5547

A taxa média de chegadas calculada foi, portanto, $\lambda = 0,55$ chamados/hora. Para determinar as taxas médias de chegadas por átomos, calcularam-se as porcentagens de chegadas de chamados em cada átomo. Dessa forma, aplicaram-se as porcentagens sobre λ , chegando-se aos λ_i de cada átomo. A Tabela 5.4 apresenta as porcentagens e as taxas médias de chegadas de chamados para cada átomo.

Tabela 5.4: Taxas médias de chegadas de chamados por átomo

Átomo	Chamados	Fração dos chamados	λ_j
1A	364	0,0918	0,0510
1B	1336	0,3371	0,1870
2A	187	0,0472	0,0262
2B	709	0,1789	0,0992
3A	283	0,0714	0,0396
3B	1084	0,2735	0,1517
Total	3963	1,0000	0,5547

5.2.1.3 Tempos de viagem

A matriz dos tempos de viagem foi estimada a partir dos próprios tempos de resposta (excetuando-se o tempo de preparação da equipe). Realizou-se uma proporção entre as distâncias percorridas pelas ambulâncias e as distâncias entre os átomos, chegando-se aos tempos de viagem. A matriz é representada pela Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Matriz dos tempos de viagem entre átomos

	1A	1B	2A	2B	3A	3B
1A	4	4	10	10	12	12
1B	4	4	10	10	12	12
2A	9	9	4	4	10	10
2B	9	9	4	4	10	10
3A	11	11	8	8	4	4
3B	11	11	8	8	4	4

É pertinente comentar dois detalhes referentes à matriz. Os tempos de viagem foram considerados iguais independentemente da partição do átomo, ou seja, considerou-se que, apesar da necessidade de biparticionar os átomos devido à presença de tipos de equipe diferentes, átomos de mesmo número dividem a mesma localização. O segundo ponto é que o deslocamento dentro de um átomo não é nulo, pois deve-se considerar a distância de deslocamento do centro do átomo aos diversos pontos no interior da sua área.

5.2.1.4 Servidores

Como já mencionado, o sistema dispõe de dois veículos de suporte básico (VSB) e um veículo de suporte avançado (VSA), todos localizados no hospital Santa Casa de Caridade, que fica no átomo 1A/1B. Ao servidor VSA (código SA001) foi adotado o número 1, aos VSB's foram adotados os números 2 (veículo de código SB002) e 3 (veículo de código SB003).

5.2.1.5 Matriz de localização

A matriz de localização foi definida a partir do conhecimento da posição da base do SAMU em Bagé. O VSA se encontra no átomo 1A, enquanto os VSB's se localizam no átomo 1B. A matriz está apresentada na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Matriz de localização dos servidores

Servidor	1A	1B	2A	2B	3A	3B
1	1	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0
3	0	1	0	0	0	0

5.2.1.6 Despacho dos servidores

Apenas um servidor é despachado por vez para atender aos chamados, o que está de acordo com a hipótese do modelo. Considerou-se ainda que, no caso de todos os servidores estarem ocupados, um chamado extra entra na fila de espera, sendo esta fila limitada por, no máximo, 3 usuários.

5.2.1.7 Ordem de preferência dos despachos

Cada átomo geográfico possui uma ordem de preferência de servidores para atendimento. Analisaram-se as distribuições de atendimento de cada um dos servidores na base de dados. A Figura 5.5 apresenta essa distribuição.

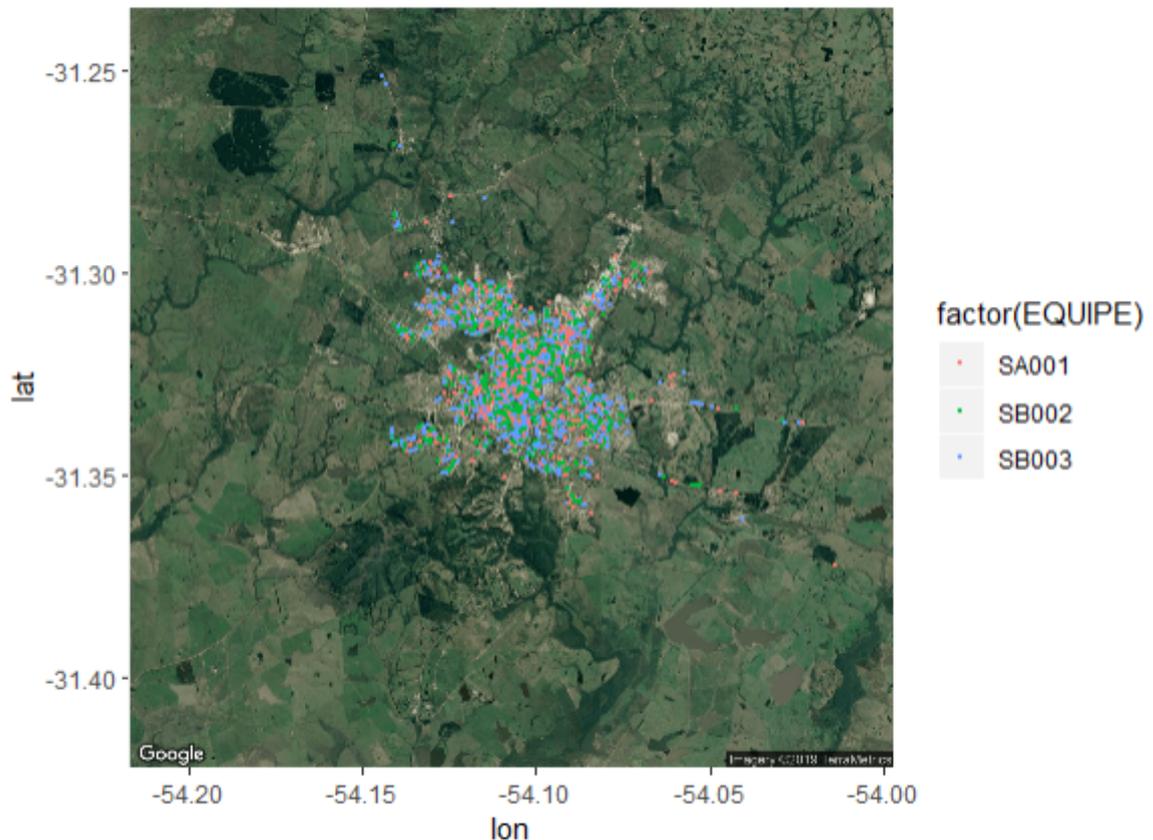


Figura 5.5: Distribuição dos atendimentos dos servidores na cidade de Bagé

Observa-se na Figura 5.5 que não há uma concentração de atendimentos de algum servidor em um local específico. Dessa forma, estabeleceu-se que os átomos 1A, 2A e 3A seriam atendidos pelo servidor 1 (VSA), ficando esse servidor com a terceira preferência de chamado para os demais átomos. O restante das preferências foi estabelecido de forma aleatória. As preferências estão expostas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Preferência de despachos

Átomo	1 ^a	2 ^a	3 ^a
1A	1	2	3
1B	2	3	1
2A	1	3	2
2B	3	2	1
3A	1	3	2
3B	2	3	1

5.2.1.8 Taxas médias de atendimentos

Foram determinadas as taxas médias de atendimentos, definidas pelo tempo médio de atendimento (TT). Essas taxas foram calculadas tanto para o sistema em geral, como para cada um dos servidores. Os valores de TT e μ_i são apresentados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Taxas médias de atendimento do sistema e servidores

Servidor	TT (média)	TT (desvio-padrão)	μ_i
1	29,8	13,3	2,0152
2	28,4	37,2	2,1123
3	31,0	37,6	1,9377
Média	29,7	29,4	2,0217

5.2.2 Equações de equilíbrio do sistema

De posse de todos os parâmetros necessários, formularam-se as equações de equilíbrio de estados do SAMU de Bagé. Elas foram determinadas de forma análoga ao apresentado no exemplo da subseção 3.3.3, respeitando as preferências de atendimento de cada um dos seis átomos.

1. S_0 : sistema vazio - (000)

$$\lambda \cdot p_{000} = \mu_1 \cdot p_{001} + \mu_2 \cdot p_{010} + \mu_3 \cdot p_{100} \quad (5.1)$$

2. S_1 : sistema com um servidor ocupado - (001), (010) e (100)

$$\lambda \cdot p_{001} + \mu_1 \cdot p_{001} = (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5) \cdot p_{000} + \mu_2 \cdot p_{011} + \mu_3 \cdot p_{101} \quad (5.2)$$

$$\lambda \cdot p_{010} + \mu_2 \cdot p_{010} = (\lambda_2 + \lambda_6) \cdot p_{000} + \mu_1 \cdot p_{011} + \mu_3 \cdot p_{110} \quad (5.3)$$

$$\lambda \cdot p_{100} + \mu_3 \cdot p_{100} = \lambda_4 \cdot p_{000} + \mu_1 \cdot p_{101} + \mu_2 \cdot p_{110} \quad (5.4)$$

3. S₂: sistema com dois servidores ocupados - (011), (101) e (110)

$$\lambda \cdot p_{011} + \mu_2 \cdot p_{011} + \mu_1 \cdot p_{011} = (\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_6) \cdot p_{001} + (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5) \cdot p_{010} + \mu_3 \cdot p_{111} \quad (5.5)$$

$$\lambda \cdot p_{101} + \mu_1 \cdot p_{101} + \mu_3 \cdot p_{101} = (\lambda_3 + \lambda_4 + \lambda_5) \cdot p_{001} + (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5) \cdot p_{100} + \mu_2 \cdot p_{111} \quad (5.6)$$

$$\lambda \cdot p_{110} + \mu_2 \cdot p_{110} + \mu_3 \cdot p_{110} = (\lambda_2 + \lambda_4 + \lambda_6) \cdot p_{100} + (\lambda_1 + \lambda_3 + \lambda_5) \cdot p_{010} + \mu_1 \cdot p_{111} \quad (5.7)$$

4. S₃: sistema cheio - (111)

$$\mu \cdot p_{111} = \lambda \cdot p_{110} + \lambda \cdot p_{101} + \lambda \cdot p_{011} \quad (5.8)$$

Considerando que a soma de todas as probabilidades dos possíveis estados do sistema é 1, aplicou-se a equação 3.10, já exposta na subseção 3.3.3, substituindo-se a equação 5.7 por ela.

O sistema de oito equações e oito incógnitas do modelo hipercubo de filas, para o sistema do SAMU de Bagé, está definido. No capítulo 6 são analisados os resultados do modelo.

Capítulo 6

Análise dos Resultados

O sistema de equações definido na subseção 5.2.2 foi resolvido a partir da *decomposição QR*, utilizando linguagem *R*. Essa linguagem de programação também foi a utilizada para desenvolver todas as análises e modelagem do sistema. Os resultados foram expostos para o sistema atual, sendo feita posteriormente uma análise sobre outra configuração possível.

6.1 Resultados da modelagem para o sistema atual

Os valores das probabilidades de cada estado do sistema (p_B), além da probabilidade do sistema se encontrar saturado (p_S), estão apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Probabilidades dos possíveis estados do sistema

Variável	Probabilidade
P₀₀₀	76,27%
P₀₀₁	4,39%
P₀₁₀	11,46%
P₁₀₀	4,77%
P₀₁₁	0,76%
P₁₀₁	0,41%
P₁₁₀	1,66%
P₁₁₁	0,26%
P₄	0,02%
P₅	0,00%
P₆	0,00%
P_S	0,28%

Observa-se na Tabela 6.1 que a probabilidade de o sistema se encontrar vazio é muito alta, 76,27%. Esse valor era esperado pela baixa quantidade relativa de chamados por dia e por período de pico. Nos estados com um servidor ocupado, o servidor com menor probabilidade de disponibilidade é o 2, com 11,46% de chances de não estar disponível.

A probabilidade de um chamado ser perdido, ou seja, a fila de espera estar com três usuários, é irrisória (0,0002%). Ao realizar um chamado, o usuário encontrará o sistema saturado com uma probabilidade (p_S) de 0,28%, também extremamente pequena.

A análise se prossegue com as medidas de desempenho do sistema.

6.1.1 *Workloads*

A Tabela 6.2 apresenta as workloads de cada um dos servidores.

Tabela 6.2: *Workloads* dos servidores para o sistema atual

Servidor	Workload
1	0,06
2	0,14
3	0,07

As *workloads* dos servidores apresentaram valores reduzidos, mais uma vez devido ao baixo número de chamados. A maior *workload* corresponde ao servidor 2, que é o preferencial nos átomos 1B e 3B, atendendo aos chamados básicos, maioria entre os chamados totais. As *workloads* dos servidores 1 e 3 são próximas, devido ao fato de o servidor 1 ser o preferencial para todos os chamados do tipo avançado, e o servidor 3 ser o preferencial apenas do átomo 2B.

A *workload* do sistema foi 0,09, indicando que o sistema, para essa medida de desempenho, está superdimensionado. É importante salientar que diminuir o número de servidores não é uma medida cabível para aprimorar o dimensionamento do sistema, pois isso afetaria os tempos de resposta aos chamados.

6.1.2 Tempos médios de viagem

O tempo médio de viagem para o sistema foi calculado, a fim de compará-lo ao tempo médio de resposta (TR) do sistema real. Aqui, pelos valores relativamente menores, os tempos de preparação de equipe foram desconsiderados. Não foram calculados os tempos médios de viagem para os átomos e servidores.

Utilizando a equação 3.15, o tempo médio de viagem do sistema (T) foi determinado. O valor encontrado foi de 8,12 minutos, apresentando uma variação de -5,58% em relação aos 8,60 minutos da amostra, valor aceitável e que comprova que o modelo hipercubo é uma ferramenta válida para aplicação em um sistema como o SAMU de Bagé.

6.2 Sistemas alternativos

Após confirmação da calibração do modelo para representar a realidade, partiu-se para alterações no sistema. Baseando-se na matriz de preferências representada na Tabela 5.7, propôs-se a descentralização dos servidores.

No sistema atual, os servidores 2 e 3 se encontram localizados no átomo 1B. Foi feita a descentralização desses servidores, alterando-se a matriz de localizações exposta na Tabela 5.6, gerando-se todas as possibilidades de localizações para os servidores 2 e 3 entre os átomos 2B e 3B. A localização exata dos servidores no interior de um átomo não é importante para a análise, porém, existem diversas unidades de saúde em cada um dos átomos geográficos da cidade de Bagé, considerando-se que os servidores foram deslocados para alguma delas.

Ao descentralizar servidores, a *workload* dos servidores não é alterada, vide equação 3.11. Dessa forma, foi feita a análise da alteração do tempo médio de viagem do sistema (T).

A Tabela apresenta os oito casos gerados, com os tempos médios de viagem (T) calculados, bem como as variações em relação ao tempo médio de viagem encontrado para o sistema atual (8,12 minutos).

Tabela 6.3: Casos de descentralização dos servidores 2 e 3

Átomo de localização					
Caso	Servidor 1	Servidor 2	Servidor 3	T (min)	Variação
1	1A	1B	2B	7,24	-10,84%
2	1A	1B	3B	7,77	-4,31%
3	1A	2B	1B	9,06	11,58%
4	1A	3B	1B	8,27	1,85%
5	1A	2B	2B	8,18	0,74%
6	1A	2B	3B	8,72	7,39%
7	1A	3B	2B	7,40	-8,87%
8	1A	3B	3B	7,93	-2,34%

Como pode-se observar na Tabela 6.3, os casos 1, 2, 7 e 8 apresentaram redução no tempo médio de viagem do sistema. A análise a seguir se baseia na Tabela 5.4 e na Tabela 5.7, que apresentam as taxas médias de chamadas por átomo e a preferência de despachos por átomo, respectivamente.

Os casos 1 e 2 apresentam a descentralização do servidor 3. No caso 1, o servidor é deslocado para o átomo 2B, o qual tem como preferência de despacho esse servidor. O átomo 2A tem o servidor 3 como segunda preferência de despacho, como não há diferença entre as localizações dos átomos 2A e 2B, o caso 1 também favorece a eficiência desse servidor. No caso 2, o servidor 3 é a segunda preferência de despacho dos átomos 3A e 3B, e a demanda do átomo 3 geral é a segunda maior entre os átomos, portanto localizar o servidor 3 no átomo 3B apresentou-se como boa alternativa operacional.

O caso 7 apresentou a segunda maior redução de tempo médio de viagem. Isso se deve ao fato do servidor 2 estar localizado no átomo 3B, o qual apresenta o servidor 2 como preferência de despacho, além de localizar o servidor 3 no átomo 2B, situação que já teve sua vantagem explicada. A redução é menor do que no caso 1, pois a demanda do átomo 1B é maior, o qual também apresenta o servidor 2 como preferencial.

O caso 8 apresentou a menor redução de tempo médio. O fato é explicado pela comparação entre as preferências de despacho dos átomos 2B e 3B, o primeiro apresentando o servidor 3 como preferencial.

Capítulo 7

Considerações Finais

Os objetivos do estudo foram alcançados. A base de dados do SAMU de Bagé, apesar de ter sido reduzida devido a diversas incoerências, mostrou-se suficiente para a aplicação do modelo.

A revisão bibliográfica sobre os diversos modelos de localização presentes na literatura teve um papel importante na elucidação da matéria de estudo. Os modelos determinísticos, apesar de não aplicados no presente trabalho, foram a base para o desenvolvimento dos modelos probabilísticos, e entendê-los fez parte do processo de desenvolvimento do modelo aplicado.

O modelo hipercubo de filas é um modelo complexo, com vários detalhes de aplicação. Apesar da complexidade, o modelo se mostrou como uma ferramenta extremamente eficaz para efetuar a análise de desempenho de um sistema de atendimento de emergência, como é o caso do SAMU no Brasil. A partir do momento em que se disponibilizam dados coerentes e mais condizentes com a situação real do sistema estudado, o modelo trará resultados confiáveis e soluções que permitem aprimorar o serviço de atendimento da região considerada.

No caso do sistema de atendimento do SAMU de Bagé, o modelo se mostrou calibrado. A análise de cenários alternativos ao sistema atualmente empregado envolveu uma das medidas de desempenho do modelo hipercubo: o tempo médio de viagem do sistema, o qual representa o tempo médio de resposta às ocorrências pelo SAMU da cidade. A alternativa proposta ao sistema atual foi a descentralização dos servidores, o que, na prá-

tica, significa alterar o ponto base das ambulâncias do sistema. Quatro casos gerados se mostraram eficazes na redução do tempo médio de viagem, concluindo-se que o modelo hipercubo de filas é um modelo de localização válido para a análise de desempenho de um sistema de atendimento de emergência médico.

Referências Bibliográficas

- [1] DATASUS - Departamento de Informática do SUS. <http://datasus.saude.gov.br/projetos/52-samu>. Acessado em: 2019-11-01.
- [2] Ibge - panorama da cidade de bagé. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/bage/panorama>. Accessed: 2019-11-01.
- [3] Ministério da Saúde - Balanço. <http://www.saude.gov.br/noticias/agencia-saude/45773-mais-de-860-ambulancias-novas-reforcam-o-samu-192>. Acessado em: 2019-11-01.
- [4] Ministério da Saúde - Serviço de Atendimento Móvel de Urgência (SAMU 192). <http://www.saude.gov.br/saude-de-a-z/servico-de-atendimento-movel-de-urgencia-samu-192>. Acessado em: 2019-11-01.
- [5] Rajan Batta, June M. Dolan, and Nirup N. Krishnamurthy. The maximal expected covering location problem: Revisited. *Transportation Science*, 23(4):277–287, 1989.
- [6] Colin E Bell and David Allen. Optimal planning of an emergency ambulance service. *Socio-Economic Planning Sciences*, 3(2):95–101, 1969.
- [7] P. Beraldi, M.E. Bruni, and D. Conforti. Designing robust emergency medical service via stochastic programming. *European Journal of Operational Research*, 158(1):183 – 193, 2004.

- [8] Jonathan W Berry, Lisa Fleischer, William E Hart, Cynthia A Phillips, and Jean-Paul Watson. Sensor placement in municipal water networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 131(3):237–243, 2005.
- [9] Fernando Chiyoshi, Roberto D Galvão, and Reinaldo Morabito. O uso do modelo hipercubo na solução de problemas de localização probabilísticos. *Gestão & Produção*, 7(2):146–174, 2000.
- [10] Mark Daskin. A maximum expected covering location model: Formulation, properties and heuristic solution. *Transportation Science*, 17:48–70, 02 1983.
- [11] M Gendreau, G Laporte, and F Semet. The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles. *Journal of the Operational Research Society*, 57(1):22–28, 2006.
- [12] Jonathan Halpern. The accuracy of estimates for the performance criteria in certain emergency service queueing systems. *Transportation Science*, 11(3):223–242, 1977.
- [13] Mumtaz Karatas, Nasuh Razi, and Hakan Tozan. A comparison of p-median and maximal coverage location models with qcoverage requirement. *Procedia Engineering*, 149:169 – 176, 2016. International Conference on Manufacturing Engineering and Materials, ICMEM 2016, 6-10 June 2016, Nový Smokovec, Slovakia.
- [14] Peter Kolesar and Edward H Blum. Square root laws for fire engine response distances. *Management Science*, 19(12):1368–1378, 1973.
- [15] Richard C Larson. *Urban police patrol analysis*. MIT Press, 1972.
- [16] Richard C. Larson. A hypercube queueing model for facility location and redistricting in urban emergency services. *Computers Operations Research*, 1(1):67 – 95, 1974.
- [17] Richard C Larson and Amedeo R Odoni. *Urban operations research*. Number Monograph. 1981.
- [18] Lori Moore. Measuring quality and effectiveness of prehospital ems. *Prehospital Emergency Care*, 3(4):325–331, 1999.

- [19] Pavankumar Murali, Fernando Ordóñez, and Maged M Dessouky. Facility location under demand uncertainty: Response to a large-scale bio-terror attack. *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1):78–87, 2012.
- [20] Nasuh Razi, Mumtaz Karatas, and Murat M Gunal. A combined optimization and simulation based methodology for locating search and rescue helicopters. In *Proceedings of the 49th Annual Simulation Symposium*, page 5. Society for Computer Simulation International, 2016.
- [21] Junaid A Razzak and Arthur L Kellermann. Emergency medical care in developing countries: is it worthwhile? *Bulletin of the World Health Organization*, 80:900–905, 2002.
- [22] Daniel Serra and Vladimir Marianov. The p-median problem in a changing network: the case of barcelona. *Location Science*, 6(1-4):383–394, 1998.
- [23] SS Radiah Shariff, Noor Hasnah Moin, and Mohd Omar. Location allocation modeling for healthcare facility planning in malaysia. *Computers & Industrial Engineering*, 62(4):1000–1010, 2012.
- [24] Renata Algisi Takeda. *Uma contribuição para avaliar o desempenho de sistemas de transporte emergencial de saúde*. PhD thesis, Universidade de São Paulo, 2000.
- [25] Sergio Timerman, Maria MC Gonzalez, Ana C Zaroni, and Jose AF Ramires. Emergency medical services: Brazil. *Resuscitation*, 70(3):356–359, 2006.

FOLHA DE REGISTRO DO DOCUMENTO

¹ CLASSIFICAÇÃO/TIPO <p style="text-align: center;">TC</p>	² DATA <p style="text-align: center;">14 de novembro de 2019</p>	³ REGISTRO N° <p style="text-align: center;">DCTA/ITA/TC-084/2019</p>	⁴ N° DE PÁGINAS <p style="text-align: center;">63</p>
⁵ TÍTULO E SUBTÍTULO: <p>Análise de desempenho do sistema do serviço de atendimento móvel de urgência (SAMU) por meio do modelo hipercubo de filas no campo da pesquisa operacional</p>			
⁶ AUTOR(ES): <p>Eduardo Campos Silva</p>			
⁷ INSTITUIÇÃO(ÕES)/ÓRGÃO(S) INTERNO(S)/DIVISÃO(ÕES): <p>Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA</p>			
⁸ PALAVRAS-CHAVE SUGERIDAS PELO AUTOR: <p>Serviços de emergência; Modelo de localização; Modelo hipercubo de filas.</p>			
⁹ PALAVRAS-CHAVE RESULTANTES DE INDEXAÇÃO: <p>Modelos matemáticos; Primeiros socorros; Avaliação de desempenho; Emergência; Pesquisa operacional.</p>			
¹⁰ APRESENTAÇÃO: <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <input type="checkbox"/> Nacional <input checked="" type="checkbox"/> Nacional <input type="checkbox"/> Internacional </div> <p>ITA, São José dos Campos. Curso de Graduação em Engenharia Civil. Orientador: Prof. Dr. Marcelo Xavier Guterres. Publicado em 2019.</p>			
¹¹ RESUMO: <p>O desenvolvimento de modelos de localização tem apresentado um papel importante no aprimoramento dos sistemas de atendimento de emergência. Suas aplicações têm uma consequência direta no nível operacional de um sistema real: a redução do tempo de atendimento e, principalmente, do tempo de resposta a um chamado de ocorrência. A escolha de um modelo adequado tem se mostrado eficaz na análise da eficiência de serviços de atendimento emergenciais. O presente trabalho efetua uma análise de desempenho do SAMU de Bagé, Rio Grande do Sul, aplicando-se o modelo hipercubo de filas. Esse modelo matemático probabilístico realiza a análise a partir do cálculo e avaliação de medidas de desempenho, considerando o caráter estocástico do processo de chegadas e atendimento de chamados. A partir da validação do modelo, criaram-se cenários alternativos ao atual sistema presente na cidade, trazendo resultados teóricos positivos.</p>			
¹² GRAU DE SIGILO: <p style="text-align: center;"> <input checked="" type="checkbox"/> OSTENSIVO <input type="checkbox"/> RESERVADO <input type="checkbox"/> SECRETO </p>			