

LOCALIZAÇÃO DE POSTOS DE TESTAGEM DURANTE SURTO DE DOENÇA  
INFECCIOSA: UMA ABORDAGEM VIA PROGRAMAÇÃO INTEIRA

Almir Antônio Monteiro Júnior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre.

Orientador:  
Pedro Henrique González Silva

Rio de Janeiro,  
Junho de 2023

# Localização de Postos de Testagem Durante Surto de Doença Infecciosa: Uma Abordagem via Programação Inteira

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre.

Almir Antônio Monteiro Júnior

Aprovada por:

---

Presidente, Pedro Henrique González Silva, D.Sc. (orientador)

---

Glauco Fiorott Amorim, D.Sc.

---

Eduardo Bezerra da Silva, D.Sc.

---

Vanessa de Almeida Guimarães, D.Sc.

---

Israel Mendonça dos Santos, D.Sc.

Rio de Janeiro,

Junho de 2023

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

M775 Monteiro Júnior, Almir Antônio  
Localização de postos de testagem durante surto de doença  
infecciosa: uma abordagem via programação inteira / Almir Antônio  
Monteiro Júnior. — 2023.  
42f. : il. color. , enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação  
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2023.  
Bibliografia : f. 40-42  
Orientador: Pedro Henrique González Silva

1. Otimização combinatória. 2. Programação linear. 3.  
Teoria das filas. 4. COVID-19, Pandemia de, 2020-. I. Silva.  
Pedro Henrique González. (Orient.). II. Título.

CDD 004.36

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Elizabete e Almir, por todo o apoio e incentivo que deram aos meus estudos e à minha educação em geral, não medindo esforços para me apoiar na realização dos meus objetivos. Dedico também à minha namorada, Liliane, por todo o apoio e incentivo tanto em relação ao ingresso no mestrado quanto no seu decorrer.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade e por ter me dado saúde e força para concluir esta fase da minha vida acadêmica; ao orientador deste trabalho, professor doutor Pedro Henrique González, por todo o incentivo, disponibilidade e apoio; aos membros da banca, que contribuíram com valiosas sugestões e considerações tanto na qualificação quanto na defesa; aos colegas que direta ou indiretamente contribuíram durante esta caminhada; aos meus pais, que sempre apoiaram de forma irrestrita meus estudos e objetivos; à minha namorada, por todo o apoio e incentivo para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Localização de Postos de Testagem Durante Surto de Doença Infecciosa: Uma Abordagem  
via Programação Inteira

Almir Antônio Monteiro Júnior

Orientadores:

Pedro Henrique González Silva

Resumo da Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de mestre.

Em situações de grandes surtos de doenças contagiosas, como a pandemia causada pelo Novo Coronavírus (COVID-19), uma rápida e eficiente resposta dos sistemas de saúde é primordial para que se minimize os impactos na vida da população. Um dos pontos a ser considerado é a rápida identificação de novos casos, visando diminuir a propagação, por se tratar de doença infectocontagiosa. Para tanto, faz-se necessária a utilização de algum modo de teste, a fim de verificar se o paciente está infectado ou não. Essa verificação deve ser feita da forma mais ágil e segura possível, para que menos pessoas tenham contato com este paciente, em caso de resposta positiva. Para isso, além de se determinar onde instalar postos de testagem, deve-se dimensionar corretamente o atendimento que será realizado, para que longas filas não se formem, aumentando os riscos de contágio. Este trabalho propõe a utilização de Programação Linear Inteira em conjunto com a Teoria das Filas para a determinação de localizações para a instalação de postos de testagem, apoiada por dados geográficos. Estes postos devem cobrir toda a demanda de um local, como uma cidade ou região, minimizando os custos de implantação e a distância percorrida por um paciente para ser testado. Além disso, eles devem sempre levar em conta as restrições de tempo de espera em fila, dada a importância de cada um destes pontos para a resolução satisfatória do problema. Diferentes cenários foram avaliados, e os resultados apontaram ser benéfica a utilização de atendimentos regionalizados, além do uso da rede de saúde já existente na cidade.

Palavras-chave:

Otimização, Programação Inteira, Teoria das Filas, Localização de Facilidades, COVID-19

Rio de Janeiro,

Junho de 2023

## ABSTRACT

Localização de Postos de Testagem Durante Surto de Doença Infecciosa: Uma Abordagem  
via Programação Inteira

Almir Antônio Monteiro Júnior

Advisors:

Pedro Henrique González Silva

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Ciência da Computação - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of master.

In large infectious outbreaks, like the one caused by COVID-19, a quick and efficient response from healthcare systems is fundamental to minimize the impact on people's life. One of the main concerns is to quickly identify new cases, to decrease the propagation, given the infectious property of the disease. Consequently, some kind of testing procedure must be implemented, to verify if the patient is contaminated or not. This test must be done as fast and secure as possible, to minimize the contact with other people, in case the patient is infected. Therefore, beside determining where to place the test centers, its capacity must be correctly calculated, to minimize long queues and so the risk of infection. This work proposes the use of Integer Programming with Queue Theory to determine the test centers locations, backed by geographical data. These centers must cover all the demand from a place, like a city or a district, minimizing the deploying costs and the distance a patient must travel to be tested. Furthermore, they always must take into account the waiting time constraints, as all those are key points to a satisfactory solution to this problem. Different scenarios were evaluated, and the results showed that the use of a regionalized service, as well as the existing health facilities, were beneficial.

Key-words:

Optimization, Integer Programming, Queue Theory, Facility Location, COVID-19

Rio de Janeiro,

Junho de 2023

## Sumário

<b>I</b>	<b>Introdução</b>	<b>14</b>
I.1	Contextualização	14
I.2	Motivação	15
I.3	Objetivos	15
I.4	Organização dos Capítulos	16
<b>II</b>	<b>Fundamentação Teórica</b>	<b>17</b>
II.1	Pesquisa Operacional	17
II.2	Programação Linear e Programação Linear Inteira	18
II.3	Problema de Localização de Facilidades	18
II.4	Teoria das Filas	19
II.4.1	Métricas	19
II.4.2	Características de Filas	20
II.4.3	Tipos de Fila	21
II.5	Doenças Contagiosas e Testagem	22
<b>III</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>23</b>
<b>IV</b>	<b>Metodologia</b>	<b>25</b>
IV.1	Modelo de Localização de Postos de Testagem com Restrições de Tempo de Fila	25
IV.2	Estudo de Caso	26
IV.2.1	Coleta e Processamento de Dados	27
IV.2.2	Cálculo das Distâncias	27
IV.2.3	Premissas do Estudo de Caso	28
<b>V</b>	<b>Experimentos Computacionais</b>	<b>30</b>
V.1	A importância do Correto Dimensionamento da Demanda	31
V.2	Baixa Demanda x Alta Demanda	32
V.3	Livre Escolha x Restrição Regional	34
V.4	O Impacto do Tempo de Atendimento	35

V.5 O Impacto da Distância Real	36
V.6 Candidatos Secundários	36
V.7 Exibição dos Resultados	36
<b>VI Conclusões</b>	<b>39</b>
Referências	40

## Lista de Figuras

- II.1 Típico Sistema de Filas - Fonte: [Shortle et al., 2018], adaptado pelo autor 19
- IV.1 Menores caminhos do bairro Badu até cada instalação de saúde no município de Niterói. Em destaque, em tom mais escuro, o setor censitário mais populoso. Em tons mais claros, o território do bairro e os caminhos até cada instalação de saúde, representadas por cruces vermelhas. Fonte: Os próprios autores. 28
- V.1 Locais candidatos a receber postos de testagem exibidos no mapa da cidade de Niterói. Os ícones vermelhos demarcam os candidatos primários (equipamentos de saúde) e os ícones verdes referem-se aos candidatos secundários (praças, escolas e instalações esportivas). Além disso, os centroides populacionais de cada bairro, com seu respectivo setor censitário, são destacados. - Fonte: Os próprios autores, com dados da Prefeitura de Niterói e IBGE. 31
- V.2 Mapa demográfico da cidade de Niterói, que mostra o bairro Icaraí como o mais populoso, com mais de 70 mil habitantes, seguido pelos bairros Fonseca e Santa Rosa, na casa dos 50 e 40 mil habitantes, respectivamente. Fonte: IBGE - Censo 2010. 32
- V.3 Quantidade média de facilidades abertas em baixa e alta demanda, com relação à limitação do número de servidores por contrato. Em ambos cenários houve diminuição progressiva do número de facilidades, ao aumentar o número máximo de servidores por contrato. Fonte: Os próprios autores. 33
- V.4 Quantidade média de servidores contratados em baixa e alta demanda, com relação à limitação do número de servidores por contrato, com estabilidade em ambos cenários. Fonte: Os próprios autores. 34
- V.5 Quantidade média de servidores contratados em cenários de 2 e 3 minutos por atendimento, com relação à limitação do número de servidores por contrato. O nível de serviço não afeta o número de servidores contratados. Porém, o aumento de um minuto no tempo de atendimento impacta significativamente o número de servidores contratados. Fonte: Os próprios autores. 35

- V.6 Mapa com os resultados encontrados pelo modelo. Cada facilidade recebe uma cor distinta, que é repassada a todos os bairros por ela atendida. Neste exemplo, o modelo foi executado com a restrição regional. Sete facilidades foram selecionadas para o atendimento à população. Fonte: Os próprios autores. 37
- V.7 Lista de resultados relativos ao mapa exibido na Figura V.6. Cada facilidade selecionada traz a lista de bairros que atende, sua capacidade de atendimento e uso atual. Fonte: Os próprios autores. 38

## Lista de Tabelas

II.1	Relação de Valores na notação de Kendall dos Tipos de Filas - Fonte: [Shortle et al., 2018], adaptado pelo autor	22
III.1	Comparação entre o trabalho desenvolvido e trabalhos relacionados. Visamos atender toda a demanda, sem um número fixo de facilidades, com restrição de tempo máximo de espera na fila e dados reais das distâncias entre os bairros e os locais candidatos.	24
V.1	Parâmetros utilizados na execução dos experimentos computacionais.	30
V.2	Relação entre as restrições regionais, a distância percorrida e o custo total da operação, em cada cenário. Os resultados mostram que é benéfica a restrição, com uma diminuição de até 16,51% da distância percorrida para um aumento máximo de apenas 3,10% do custo da operação. Fonte: Os próprios autores.	35
V.3	Parâmetros utilizados na execução dos experimentos do cálculo de distância real x fórmula de Haversine.	36

## Lista de Abreviações

COVID-19 Novo Coronavírus	14, 15, 22, 23
OMS      Organização Mundial Da Saúde	22

## Capítulo I Introdução

### I.1 Contextualização

Entre o fim de 2019 e o início de 2020, o mundo foi tomado pela preocupação com uma doença altamente contagiosa, o COVID-19. Com os primeiros surtos na China, que posteriormente se espalharam pelo mundo, a epidemia alcançou o *status* de pandemia em março de 2020 [OPAS, 2022]. Em pouco tempo, os hospitais foram tomados por pessoas buscando atendimento, sobrecarregando ainda mais os sistemas de saúde, resultando em milhões de mortes pelo mundo [OMS, 2022]. Seja o COVID-19 ou qualquer outra doença contagiosa, é primordial que se minimize o contato entre infectados e não-infectados, para que haja a diminuição do contágio. Para tanto, deve-se identificar o quanto antes os indivíduos infectados e afastá-los do convívio com outras pessoas até que não haja mais o risco de contágio. Logo, a realização de testes é fundamental [Brasil, 2021], assim como a organização por trás desse atendimento. Por se tratar de doença contagiosa, fazer com que um indivíduo espere horas em uma fila para ser testado pode aumentar os riscos de contágio, devido às aglomerações [OMS, 2023]. Assim como também é prejudicial fazer com que este mesmo indivíduo infectado se desloque por dezenas de quilômetros para ser testado, muitas vezes utilizando o transporte público, aumentando o risco de transmissão do vírus ou mesmo desmotivando-o a realizar o teste.

Ao passo que é importante reduzir ao máximo o deslocamento de um indivíduo para ser testado, restrições de orçamento dificultam que um local de testagem seja aberto em cada bairro de uma cidade. Mesmo que já exista uma estrutura para recebê-lo, ainda se aplicarão custos, como a contratação de pessoal qualificado para realizar os testes. Logo, é de suma importância a correta definição dos locais que receberão os postos de testagem, assim como o correto dimensionamento da demanda que eles deverão suprir.

Uma forma de se realizar este estudo é através de um problema de otimização conhecido como Problema da Localização de Facilidades [Ahmadi-Javid et al., 2017]. Dada uma série de locais candidatos para a instalação de uma ou mais facilidades e uma série de demandas a se atender, o modelo de otimização deve definir quais os melhores pontos para se realizar as instalações, com base em algum critério previamente estabelecido, como a minimização de distância a ser percorrida ou a maximização de atendimento a ser realizado.

Em contrapartida, não há ganho em se definir os locais e não analisar a demanda prevista e sua frequência de chegada, uma vez que é improvável que todo o público esperado compareça ao mesmo tempo na facilidade. Portanto, dimensionar o atendimento é importante tanto para que não haja sobrecarga dos testadores, quanto para evitar grandes intervalos de ociosidade para a equipe de testes, o que levaria a desperdício de orçamento. Para tratar desta dimensão do problema, pode-se utilizar a Teoria das Filas, que oferece métodos para que sejam calculadas a demanda e o atendimento médios, probabilidade de tamanho e tempo de espera na fila [Marianov and Serra, 2002].

Ao aplicar as teorias apresentadas em um problema de localização considerando uma região real, é interessante que os dados analisados, como a distância entre o local de demanda e o de testagem, sejam os mais precisos possíveis. Para tanto, podemos fazer uso de dados geográficos, como a localização exata das instalações de saúde, as regiões administrativas da área em análise e sua malha rodoviária, com o intuito de se gerar um resultado altamente condizente com a realidade.

## **I.2 Motivação**

A motivação deste trabalho é a definição e aplicação de um modelo de Programação Linear Inteira que possa auxiliar o poder público no enfrentamento a situações como a pandemia do COVID-19 de uma forma mais ágil e assertiva, com otimização dos recursos disponíveis. O resultado desta pesquisa permitirá que, com os dados que geralmente já se possui em mãos, como população e locais candidatos à instalação dos postos de teste, o poder público possa em um curto intervalo de tempo ter respostas e agir de forma assertiva, minimizando os impactos para a população.

O uso combinado do problema de localização de facilidades com a teoria de filas, apoiado pelos dados geográficos, permitirá, em um só modelo, definir e organizar a campanha de testes de uma cidade ou região, de forma fundamentada e precisa, reduzindo desperdícios e necessidades de mudanças bruscas no planejamento devido a falhas, no caso de um planejamento manual e pouco ou nada embasado.

## **I.3 Objetivos**

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo de Programação Linear Inteira aplicado ao apoio à tomada de decisão, criado à partir do problema de localização de facilidades, em conjunto com a teoria das filas, apoiado por dados geográficos. Este modelo permitirá a definição de locais de instalação de postos de testagem durante surtos de doenças infecciosas, como o ocorrido durante a pandemia de COVID-19, levando em conta a demanda, com o intuito de evitar a formação de grandes filas, que prolongam o tempo de espera de um paciente para ser testado. Para tanto, ele

também definirá a quantidade de funcionários responsáveis pela testagem em cada posto, em função dos contratos disponíveis e do tempo de espera da fila.

#### **I.4 Organização dos Capítulos**

Este trabalho está organizado da seguinte forma: No Capítulo II, apresentamos as definições necessárias ao entendimento do problema abordado e das técnicas utilizadas para a sua resolução. No Capítulo III são abordados trabalhos relacionados ao tema em foco e a forma como estão sendo analisados e resolvidos problemas semelhantes na literatura. No Capítulo IV apresentamos a metodologia utilizada neste trabalho, como a aquisição e preparação dos dados necessários, enquanto o Capítulo V apresenta os experimentos computacionais realizados e discorre sobre seus resultados. Por fim, o Capítulo VI apresenta as conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## Capítulo II Fundamentação Teórica

Neste capítulo, abordaremos os principais conceitos que devem ser compreendidos para o entendimento do trabalho desenvolvido.

### II.1 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional surgiu na Inglaterra, no período da Segunda Guerra Mundial. Seu foco era otimizar, com base científica, o emprego dos equipamentos de guerra [Taha, 2008]. É uma ferramenta de apoio à decisão que visa maximizar ou minimizar determinado resultado, atrelado a uma ou mais restrições impostas [Taha, 2008]. Após a guerra, passou a ser empregada em diversas áreas, como finanças, marketing e engenharia de produção [Barbosa and Zanardini, 2015].

A Pesquisa Operacional possui como parte central de sua teoria e prática o uso de modelos matemáticos para a representação de processos e sistemas. Estes modelos devem conter características do problema o suficiente para representá-lo, mas sem perderem a capacidade de serem analisados, devido à complexidade exagerada [Carter et al., 2019].

Um ponto a se destacar na Pesquisa Operacional é que não há apenas uma forma de se resolver todos os problemas ligados à área. Cada problema, a depender de seu tipo ou complexidade, será melhor resolvido por uma técnica ou outra. Entre as técnicas mais utilizadas, está a Programação Linear, definida por um modelo que possui tanto restrições como função objetivo lineares. Há também a Programação Inteira, a qual ao menos uma das variáveis envolvidas tem seu domínio definido como um subconjunto dos inteiros; a Programação Dinâmica, que divide o problema principal em subproblemas e os resolve; a Otimização em Redes; a Programação Não-Linear, entre outras. [Taha, 2008].

Outra peculiaridade dos problemas é que, dependendo de sua complexidade, pode não ser possível resolvê-los com os algoritmos de otimização disponíveis e encontrar a solução ótima. Sendo assim, é necessário seguir por outro caminho e apostar no uso de heurísticas e metaheurísticas para tentar encontrar uma solução viável de qualidade [Taha, 2008].

## II.2 Programação Linear e Programação Linear Inteira

A Programação Linear visa maximizar ou minimizar uma função objetivo, respeitando uma ou mais restrições, todas lineares [Bertsimas and Tsitsiklis, 1997]. Sua forma padrão é representada pelo Modelo II.1, onde  $c'x$  é a função objetivo, que neste caso será minimizada, devido à expressão  $\min$  que a precede, e as expressões  $Ax = b$  e  $x \geq 0$  são as restrições que a solução encontrada precisa satisfazer [Bertsimas and Tsitsiklis, 1997].

$$\begin{aligned} \min \quad & c'x \\ \text{s.a.} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \end{aligned} \tag{II.1}$$

Já a Programação Linear Inteira é caracterizada por possuir uma ou mais variáveis cujo domínio seja definido como um subconjunto dos inteiros. Caso todas as variáveis do problema possuam esta característica, é denominada Programação Linear Inteira Pura; caso contrário, leva o nome de Programação Linear Inteira Mista [Taha, 2008].

Sua estrutura é similar a de um problema de Programação Linear. A única exceção é esta restrição de que ao menos uma das variáveis deve assumir apenas valores inteiros, e não mais contínuos. O Modelo II.2 representa sua forma padrão.

$$\begin{aligned} \min \quad & c'x \\ \text{s.a.} \quad & Ax = b \\ & x \geq 0 \\ & x \text{ inteiro} \end{aligned} \tag{II.2}$$

## II.3 Problema de Localização de Facilidades

Os problemas de Localização de Facilidades inicialmente estudados faziam referência ao contexto industrial. Eles buscavam definir os melhores lugares para se instalar uma ou mais fábricas que pudessem atender às demandas de clientes com o mínimo custo [Galvão, 2004].

Esta classe de problemas possui diversas variações, como facilidades com e sem restrições da quantidade de demanda que podem atender, número fixo ou não de facilidades que podem ser instaladas e tipo de cobertura da demanda que estas facilidades deverão atender.

Estes são problemas clássicos, investigados pela academia há décadas. Os primeiros modelos para problemas de facilidades não-capacitadas, ou seja, aquelas que não possuem restrições quanto à demanda que podem atender, foram apresentados ainda na década de 1960 [Kuehn and Hamburger, 1963; Hakimi, 1964]. Já os problemas de cobertura foram inicialmente definidos na década de 1970

[Church and Reville, 1974]. Estes problemas consideram que uma área que possui uma demanda é coberta por uma facilidade se esta estiver localizada dentro de uma distância (ou tempo) limite [Galvão, 2004]. Podem ter como requisito a cobertura de toda a demanda ou a cobertura de toda a demanda possível (por exemplo, no caso de uma restrição no número máximo de facilidades que podem ser abertas).

## II.4 Teoria das Filas

A Teoria das Filas consiste em modelar analiticamente um sistema ou processo que gera espera [Fogliatti and Mattos, 2007]. Seu objetivo é avaliar a produtividade deste sistema ou processo. Foi investigada pela primeira vez em 1909 pelo matemático dinamarquês A. K. Erlang, com foco na aplicação em sistemas de telefonia, observando os problemas de congestionamento de linhas [Shortle et al., 2018]. A Figura II.1 demonstra um típico sistema de fila.

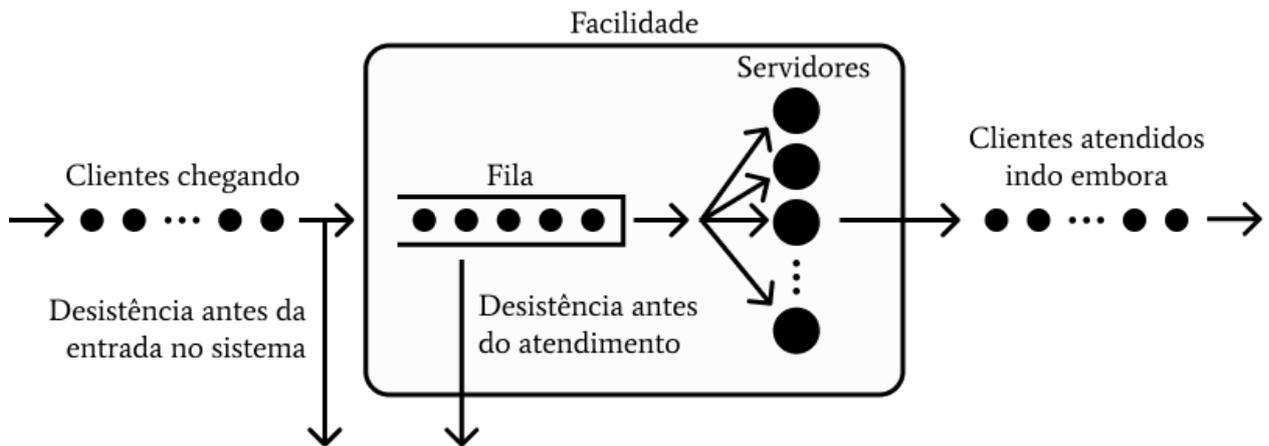


Figura II.1: Típico Sistema de Filas - Fonte: [Shortle et al., 2018], adaptado pelo autor

### II.4.1 Métricas

A Teoria das Filas possui diversas métricas que permitem avaliar como um sistema ou processo está se comportando. A seguir, uma breve explicação das principais métricas é apresentada:

#### Clientes no Sistema e na Fila

A respeito do número de clientes, há dois tipos que podem ser mensurados: o número de clientes na fila e o número total de clientes no sistema, ou seja, os clientes da fila mais os que estão sendo atendidos. O primeiro pode ser interessante para a definição da criação de um local de espera com cadeiras, por exemplo. O segundo, para identificar quantos máquinas poderiam apresentar problema sem que afetasse tanto o atendimento. O número de clientes na fila pode ser denotado como  $L_q$ , enquanto o número total de clientes no sistema é representado por  $L$  [Shortle et al., 2018].

Posteriormente, suas formas de cálculo para o tipo de fila que será utilizada no trabalho serão apresentadas.

### **Tempo de Espera**

Há dois tipos de tempo de espera que podem ser mensurados: o tempo de fila e o tempo de fila mais o tempo de atendimento, ou seja, o tempo gasto dentro do sistema. Dependendo da aplicação, um pode ser mais relevante que o outro. Um cliente esperando atendimento fica insatisfeito se o tempo de fila for alto. Por outro lado, se uma máquina está parada aguardando manutenção, é o tempo total que interessa mais, pois é o tempo em que ela está parada, sem produzir [Shortle et al., 2018]. O tempo de espera na fila pode ser representado por  $W_q$  e o tempo no sistema, por  $W$ . Posteriormente, equações que demonstram o cálculo de  $W_q$  e  $W$  no tipo de fila que será utilizado no trabalho serão apresentadas.

### **Tempo Ocioso**

Outra métrica é o tempo em que um servidor ou o sistema como um todo ficará ocioso. Com isso, pode-se dimensionar corretamente o número de servidores, reduzindo o desperdício com custo de atendimento desnecessário [Shortle et al., 2018].

## **II.4.2 Características de Filas**

Um sistema de fila pode ser descrito por basicamente seis características principais: Padrão de chegada de clientes; Padrão de Atendimento de servidores; Número de servidores e canais de serviço; Capacidade do sistema; Disciplina da fila; e Número de estágios de serviço [Shortle et al., 2018]. Cada uma destas características será explicada em detalhes nas sub-seções seguintes.

### **Padrão de Chegada de Clientes**

Em uma fila, o padrão de chegada de clientes costuma ser estocástico, com uma distribuição probabilística do tempo entre uma chegada e outra. Caso esse padrão não se altere em um determinado momento do dia, chama-se *estacionário*. Caso contrário, se esse padrão de chegada se altera no decorrer de um período, é chamado de *não-estacionário*. Um processo de chegada muito comum de ser usado é o processo de Poisson [Shortle et al., 2018].

### **Padrão de Atendimento de Servidores**

Assim como o padrão de chegada, o padrão de atendimento é importante de ser analisado, pois define o andamento do atendimento como um todo. Este padrão pode ser, como o de chegada, estacionário ou não-estacionário [Shortle et al., 2018].

## Número de Servidores

Definir corretamente o número de servidores é crucial para um bom balanceamento entre qualidade de atendimento e custo [Shortle et al., 2018]. Portanto, esta característica de um sistema de filas é muito importante e sua definição exige muita atenção.

## Capacidade do Sistema

Esta característica é relativa aos sistemas de filas finitas, pois envolve uma limitação física do número de clientes no sistema. Em uma fila finita, se o espaço total já está sendo ocupado, o próximo cliente a chegar é forçado a desistir do atendimento [Shortle et al., 2018]. Um exemplo pode ser um teatro lotado em que, não importa o quanto espere na fila, o cliente não será atendido. Neste caso, não assistirá ao espetáculo.

## Disciplina da Fila

Esta característica diz respeito ao comportamento de atendimento da fila. Seus principais tipos são: primeiro a chegar, primeiro a ser atendido; último a chegar, primeiro a ser atendido; seleção aleatória; e filas de prioridade [Shortle et al., 2018].

## Número de Estágios de Serviços

Sistemas de fila também podem ser compostos de vários estágios. Ao finalizar o atendimento em um estágio, o cliente segue para o próximo, até que deixe o sistema. Este tipo de sistema é muito comum em linhas de produção. Pode ocorrer, nos sistemas multiestágios, a reciclagem, que é quando um cliente atendido em um nível mais à frente retorna a um nível anterior para ser novamente atendido [Shortle et al., 2018].

### II.4.3 Tipos de Fila

Baseada nas características citadas na subseção anterior, diversos tipos de fila podem existir. Para melhor organização, uma notação foi definida por [Kendall, 1953], composta por uma série de símbolos e barras:  $A/B/X/Y/Z$ , onde  $A$  corresponde ao processo de chegada;  $B$  corresponde à relação serviço-tempo;  $X$  corresponde ao número de servidores;  $Y$  corresponde à capacidade do sistema; e  $Z$  corresponde à disciplina da fila. A Tabela II.1 demonstra possíveis valores para cada símbolo.

Símbolo	Valor	Descrição
$A$ e $B$	$D$	Determinística
	$M$	Exponencial
	$E_k$	Erlang tipo $k$ ( $k = 1, 2, \dots$ )
	$H_k$	Combinação de $k$ exponenciais
	$Ph$	Tipo Fase
	$G$	Geral
$X$	$1, 2, 3, \dots, \infty$	Número de Servidores
$Y$	$1, 2, 3, \dots, \infty$	Capacidade do Sistema
$Z$	$FCFS$	( <i>First Come, First Served</i> - Primeiro a Chegar, Primeiro a Sair)
	$LCFS$	( <i>Last Come, First Served</i> - Último a Chegar, Primeiro a Sair)
	$RSS$	Seleção Aleatória
	$PR$	Prioridade
	$GD$	Disciplina Geral

Tabela II.1: Relação de Valores na notação de Kendall dos Tipos de Filas - Fonte: [Shortle et al., 2018], adaptado pelo autor

## II.5 Doenças Contagiosas e Testagem

São consideradas doenças contagiosas aquelas que podem ser transmitidas entre os seres humanos sem a participação de um vetor específico, sendo transmitidas, por exemplo, através de toque [Bonita et al., 2010].

No âmbito de uma doença contagiosa, a rápida identificação de um paciente infectado é essencial para tentar diminuir o contágio, isolando-o preventivamente do convívio com outras pessoas até que o risco de transmissão passe. Devido ao recente caso da pandemia de COVID-19, estes procedimentos de testagem ganharam bastante destaque. A Organização Mundial da Saúde (OMS) destaca que a testagem é de suma importância no combate à COVID-19, funcionando como primeira linha de defesa, já que permite identificar e isolar o paciente de forma precoce [Brasil, 2021]. Com a recomendação da OMS para que um paciente suspeito seja testado o mais rápido possível, fez-se necessária a criação de uma estratégia de testagem. Falando especificamente do Brasil, duas ações foram implementadas, o Confirma Covid e o Testa Brasil. Este último visa identificar pacientes que estejam infectados, através de programas de testagem de indivíduos sintomáticos e assintomáticos, através de testes rápidos. Por outro lado, o Confirma Covid é indicado para pacientes que possuam suspeita de infecção, mesmo no caso de o teste rápido ter dado negativo [Brasil, 2021].

O teste é realizado em postos de testagem, que são equipamentos de saúde, geralmente montados de forma temporária em grandes espaços, como praças e estacionamentos [Wolfinger et al., 2021]. Pode-se também aproveitar equipamentos já existentes, como postos de saúde [Brasil, 2021]. Estes postos permitem que casos suspeitos sejam avaliados de forma ágil, por meio de testes rápidos, direcionando para uma análise mais profunda caso seja necessário [Brasil, 2021].

### Capítulo III Trabalhos Relacionados

Neste capítulo, abordaremos trabalhos relacionados à pesquisa desenvolvida. Os trabalhos foram localizados através de *Strings* de busca em repositórios de artigos, com termos como *Facility Location*, *Integer Programming*, *Metaheuristic*, *Health*, *Queue* e *Congested*.

O problema de Localização de Facilidades é pesquisado de forma extensa há décadas [Kuehn and Hamburger, 1963; Hakimi, 1964; Church and Revelle, 1974] e sua aplicação na área da saúde ganhou ainda mais atenção após o início da pandemia de COVID-19 [Risanger et al., 2021; Liu et al., 2023; Li et al., 2022; Hassan et al., 2021; Delgado et al., 2022; Cabanilla et al., 2022]. Com a necessidade de se otimizar o emprego do orçamento e do pouco tempo disponível para combater o avanço do vírus, diversos esforços foram feitos para a entrega de soluções que pudessem auxiliar neste momento crítico, com as mais diversas abordagens.

No que diz respeito à definição de um número exato de facilidades a serem instaladas, Hassan et al. [2021] apresentaram um modelo para indicar, dentre 8 províncias do Egito, o local ideal para a instalação de hospitais de campanha, visando atender o máximo possível de habitantes. Um outro trabalho seguindo esta vertente foi realizado por Delgado et al. [2022], que buscou a criação de um modelo para a identificação dos melhores locais para a instalação de facilidades de saúde, visando três pilares: cobertura, equidade e acessibilidade, dado um número  $k$  de facilidades que podem ser abertas. Em um caminho similar, Risanger et al. [2021] apresentaram um modelo para a definição de farmácias independentes ou grandes redes que poderiam servir como locais de testagem para a população dos Estados Unidos. Porém, diferentemente dos trabalhos citados anteriormente, que buscavam atender ao máximo possível de demanda, sua pesquisa levou em conta apenas se um ponto de testagem existia em determinada localidade, sem levar em conta a demanda, assumindo que cada rede já estaria preparada para assumir a demanda de cada região. Um ponto a se destacar de sua pesquisa é a utilização de um fator de “Disponibilidade de Viajar”, que levou em conta a pré-disposição que um cidadão teria para viajar até outro local para ser testado, e o quanto ele estaria disposto a viajar. Outro trabalho a focar na definição dos locais, sem levar em conta a demanda, foi o desenvolvido por Akwafuo et al. [2022], que apresenta um método de agrupamento para a definição dos melhores locais para a instalação de equipamentos de saúde na Nigéria, no caso de emergências.

Em relação aos trabalhos que levam em consideração o atendimento de toda a demanda ne-

cessária, e não apenas o máximo possível, podemos citar o desenvolvido por Liu et al. [2023], que propõe a definição de locais para instalação de facilidades de saúde em duas etapas: a primeira, com base em uma demanda inicial; e a segunda, com base em um mecanismo que ajusta a capacidade de atendimento de forma dinâmica. Outro trabalho a abordar esta vertente é o de Christensen and Klose [2021], que visa minimizar o custo da implantação de facilidades, enquanto garante o atendimento de toda a demanda.

Além disso, em um contexto de pandemia, deve-se haver a preocupação com a capacidade de atendimento de uma facilidade, com vistas a minimizar a ocorrência de aglomerações. Em relação a isso, é importante a adoção de medidas para esse balanceamento, o que pode ser realizado, por exemplo, através da aplicação de técnicas oriundas da Teoria das Filas. O trabalho realizado por Pereira et al. [2015] aplicou estas técnicas na formulação de um modelo que restringe o tempo de espera de um cliente por atendimento ou o tamanho máximo de fila que ele pode encontrar ao chegar para ser atendido. Trabalho similar foi realizado por Tavakkoli-Moghaddam et al. [2017], que apresentou um modelo que leva em consideração facilidades com  $m$  servidores para lidar com o atendimento da demanda. Outro trabalho a realizar esta tarefa foi o apresentado por Marianov et al. [2005], em que o próprio modelo define quantos servidores serão alocados a cada facilidade, com base na demanda variável de clientes.

Algo a se destacar nos trabalhos analisados é como o cálculo das distâncias é considerado. Quando há essa informação, são usadas como referências coordenadas, encontrando as distâncias entre os pontos de forma aproximada, como por meio da distância euclidiana [Tavakkoli-Moghaddam et al., 2017] ou de haversine [Risanger et al., 2021; Akwafuo et al., 2022]. Apenas o trabalho realizado por Cabanilla et al. [2022] abordou de forma semelhante à nossa proposta o cálculo das distâncias, com o emprego da malha rodoviária real da região estudada. A Tabela III.1 sintetiza esses estudos, fazendo uma comparação entre eles e o trabalho que desenvolvemos.

Autores	Número fixo de Facilidades	Cobre toda a Demanda	Considera o Tempo de Espera	Dados reais de distâncias
Hassan et al.	X			
Delgado et al.	X			
Risanger et al.	X			
Akwafuo et al.	X			
Liu et al.		X		
Christensen e Klose		X		
Pereira et al.	X		X	
Tavakkoli-Moghaddam et al.		X	X	
Marianov et al.			X	
Cabanilla et al.	X	X		X
<b>Nosso trabalho</b>		<b>X</b>	<b>X</b>	<b>X</b>

Tabela III.1: Comparação entre o trabalho desenvolvido e trabalhos relacionados. Visamos atender toda a demanda, sem um número fixo de facilidades, com restrição de tempo máximo de espera na fila e dados reais das distâncias entre os bairros e os locais candidatos.

## Capítulo IV Metodologia

Neste capítulo, descrevemos a metodologia adotada neste trabalho, desde a definição do modelo matemático até a formatação do estudo de caso, incluindo as premissas assumidas e a coleta dos dados necessários para sua execução.

### IV.1 Modelo de Localização de Postos de Testagem com Restrições de Tempo de Fila

A definição dos locais mais adequados para a instalação dos postos de testagem pode ser formulada como um problema de Programação Linear Inteira. Entre as restrições do problema, podemos estabelecer a necessidade de que o tempo máximo de atendimento de cada posto não exceda um tempo máximo de espera  $\tau$ . Esse tempo máximo pode ser calculado previamente com base em parâmetros pré-estabelecidos, como o tempo médio de atendimento e o número de servidores, e incorporado ao modelo matemático [Marianov and Serra, 2002]. O objetivo do modelo é minimizar os custos de operação e a distância percorrida para realizar os testes. Partindo destas condições, o modelo de localização de postos de testagem com restrições de tempo de fila foi desenvolvido e será detalhado a seguir:

$$\min \sum_{j \in F} \sum_{c \in C_j} p_{jc} y_j^c + \sum_{i \in B} \sum_{j \in F_i} d_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{s.a.} \quad \sum_{j \in F_i} x_{ij} = 1 \quad \forall i \in B \quad (2)$$

$$x_{ij} \leq \sum_{c \in C_j} y_j^c \quad \forall i \in B, j \in F_i \quad (3)$$

$$\sum_{c \in C_j} y_j^c \leq 1 \quad \forall j \in F \quad (4) \quad (\text{IV.1})$$

$$\sum_{i \in B_j} f_i x_{ij} \leq \sum_{c \in C_j} y_j^c \lambda_{m(c)}^{\alpha_j} \quad \forall j \in F \quad (5)$$

$$y_j^c \in \{0, 1\} \quad \forall j \in F, c \in C_j \quad (6)$$

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

onde:

$p_{jc}$	Custo do posto $j$ com o contrato $c$
$y_j^c$	Variável binária que indica se um posto $j$ está vinculado a um contrato $c$ . No caso de haver vínculo, recebe o valor 1. Do contrário, recebe o valor 0
$d_{ij}$	Variável que indica a distância entre o bairro $i$ e o posto $j$
$x_{ij}$	Variável binária que indica se o bairro $i$ está sendo atendido pelo posto $j$ . No caso de o bairro $i$ estar sendo atendido pelo posto $j$ , recebe o valor 1. Do contrário, recebe o valor 0
$f_i$	Demanda do bairro $i$ a ser atendida
$\lambda_{m(c)}^{\alpha j}$	Capacidade de $j$ com $m$ servidores do contrato $c$ e probabilidade mínima $\alpha$ de não ultrapassar o tempo máximo de espera

A função objetivo (1) pretende minimizar os custos de implantação dos postos de testagem, assim como a distância percorrida pelos cidadãos para serem testados. A família de restrições (2) diz que cada bairro só pode ser atendido por um posto de testagem, funcionando como uma espécie de unidade de referência; A família de restrições (3) diz que só pode haver a relação bairro/posto de testagem se o posto de testagem estiver aberto naquele local; A família de restrições (4) diz que um posto de testagem pode ter apenas um contrato vinculado a ele; A família de restrições (5) diz respeito à demanda, onde a demanda vinculada a cada posto de testagem não pode ser maior do que a que o posto é capaz de atender, levando em conta a limitação de um tempo máximo de espera, dada uma determinada probabilidade mínima  $\alpha$  de que um usuário não espere por atendimento por um período maior do que o definido. As famílias de restrições (6) e (7) garantem que as variáveis de decisão  $y_j^c$  e  $x_{ij}$  sejam binárias, assumindo apenas os valores 0 ou 1.

## IV.2 Estudo de Caso

A cidade de Niterói, localizada na Região Metropolitana do Rio de Janeiro, foi escolhida como o cenário prático deste estudo. Como uma das principais economias do estado, esse município desempenha um papel importante no território fluminense, destacando-se pela sua localização estratégica próxima à Baía de Guanabara e à capital estadual.

Para realizar adequadamente este estudo de caso, foram realizados alguns passos iniciais, incluindo a coleta e o pré-processamento de dados geográficos e populacionais do município, bem como a definição dos parâmetros e condições do estudo.

### IV.2.1 Coleta e Processamento de Dados

Para acessar os dados geográficos e populacionais da cidade de Niterói, utilizamos as malhas geográficas<sup>1</sup> e os dados<sup>2</sup> fornecidos pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), referentes aos setores censitários do último Censo, realizado em 2010. Com essas informações isoladas para a cidade, foi possível unificar os setores censitários em bairros, formando a malha municipal.

Utilizamos os dados populacionais para determinar o centroide populacional de cada bairro. Para isso, identificamos o setor censitário com a maior população dentro de cada bairro e calculamos o centroide desse setor censitário. Esses centros de população serviram como pontos de referência para o cálculo das distâncias entre os bairros e os locais candidatos.

Após o processamento dos dados geográficos e populacionais, procedemos à definição dos locais candidatos para a instalação dos postos de testagem. Mapeamos as instalações de saúde existentes na cidade, excluindo hospitais, clínicas especializadas e estabelecimentos similares devido à alta demanda que normalmente possuem, mesmo em situações não pandêmicas. Esses dados foram obtidos através de um repositório de dados georreferenciados disponibilizado pela prefeitura de Niterói<sup>3</sup>. As instalações de saúde foram selecionadas como locais candidatos devido à sua conveniência, uma vez que já possuem infraestrutura adequada para a realização dos testes, contribuindo assim para o objetivo de minimização dos custos.

### IV.2.2 Cálculo das Distâncias

Com base nos dados dos bairros e nos locais candidatos para a instalação dos postos de testagem, calculamos as distâncias entre eles, utilizando uma abordagem diferenciada em relação à maioria dos estudos consultados. Para isso, empregamos dados reais da malha rodoviária da cidade, por meio do serviço chamado Projeto OSRM (*Open Source Routing Machine*). Esse serviço utiliza dados georreferenciados de pontos de interesse provenientes da base aberta e colaborativa do *OpenStreetMap*, e permite o cálculo preciso das distâncias. A escolha de utilizar caminhos reais, em vez de uma abordagem baseada em aproximações, deve-se à necessidade de obter resultados mais acurados, evitando deslocamentos desnecessários dos pacientes, que podem levar a um maior risco de infecção. A Figura IV.1 exemplifica alguns destes caminhos no mapa.

<sup>1</sup>[https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao\\_do\\_territorio/malhas\\_territoriais/malhas\\_de\\_setores\\_censitarios\\_\\_divisoes\\_intramunicipais/censo\\_2010/setores\\_censitarios\\_shp/rj/rj\\_setores\\_censitarios.zip](https://geoftp.ibge.gov.br/organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios__divisoes_intramunicipais/censo_2010/setores_censitarios_shp/rj/rj_setores_censitarios.zip)

<sup>2</sup>[https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo\\_Demografico\\_2010/Resultados\\_do\\_Universo/Agregados\\_por\\_Setores\\_Censitarios/RJ\\_20171016.zip](https://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/Agregados_por_Setores_Censitarios/RJ_20171016.zip)

<sup>3</sup><https://www.sigeo.niteroi.rj.gov.br/pages/dados-abertos>

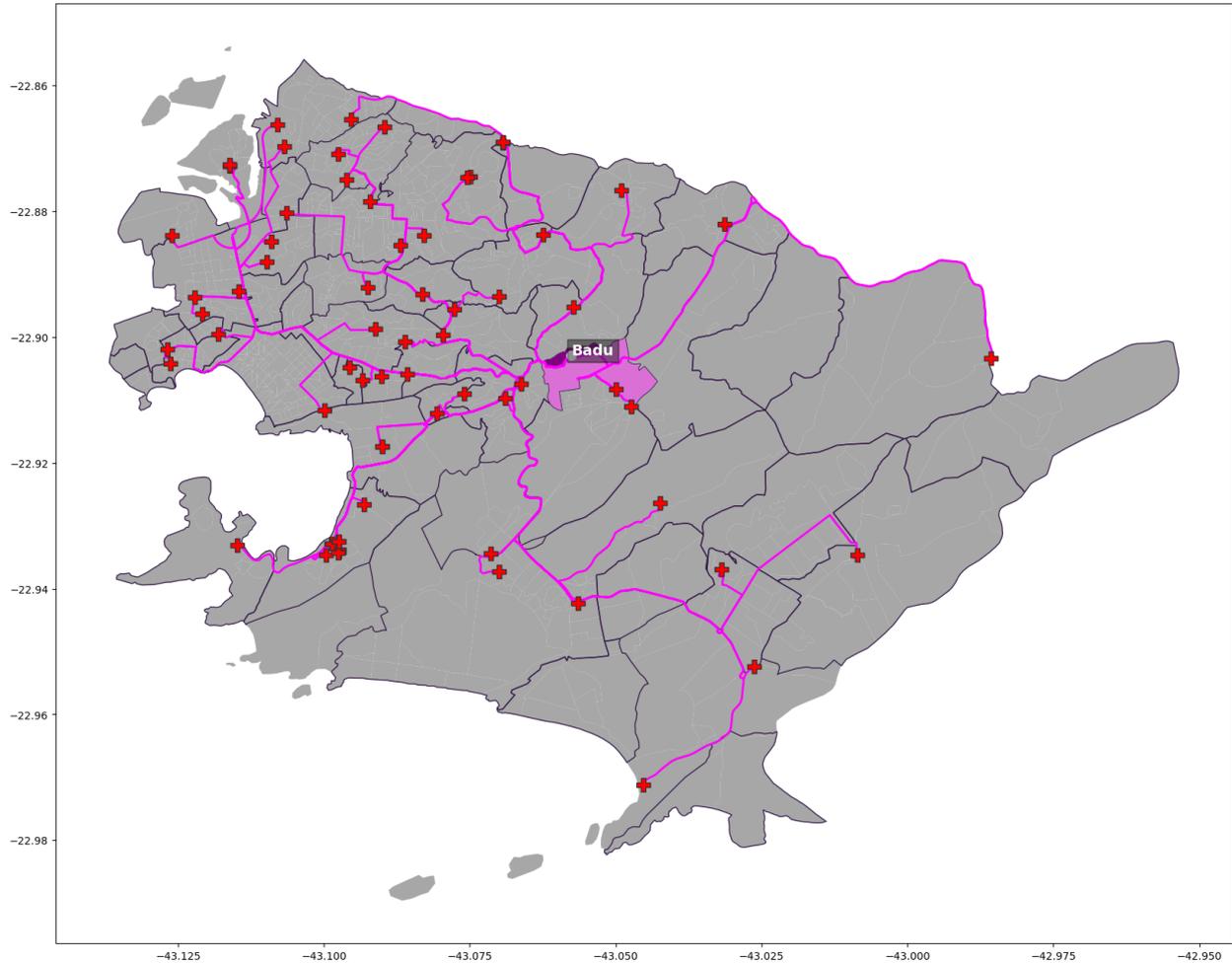


Figura IV.1: Menores caminhos do bairro Badu até cada instalação de saúde no município de Niterói. Em destaque, em tom mais escuro, o setor censitário mais populoso. Em tons mais claros, o território do bairro e os caminhos até cada instalação de saúde, representadas por cruzes vermelhas. Fonte: Os próprios autores.

### IV.2.3 Premissas do Estudo de Caso

Além de mapear os bairros, os locais candidatos e as distâncias entre eles, outras premissas devem ser definidas para a execução do modelo, como o custo de operação e a demanda necessária para cada bairro.

Em relação aos custos de operação, consideramos que cada posto aberto possui um contrato de serviço associado, que determina o número de servidores responsáveis pelos testes. Além disso, pode haver um custo de abertura.

O custo de abertura refere-se ao valor necessário para iniciar as operações em um posto. Neste estudo, foram consideradas duas situações: a utilização de instalações de saúde já existentes, o que eliminaria o custo de abertura, uma vez que esses locais já possuem a infraestrutura necessária para atender a população; e a incorporação de outros locais, como praças, escolas e instalações esportivas, que teriam um custo inicial para iniciar as operações. A inclusão desses locais foi motivada pela

observação de uma grande concentração de instalações de saúde próxima ao centro da cidade, com pouca oferta ao se afastar desta região.

Cada posto de testagem aberto deverá ter um contrato de serviço vinculado a ele. Este contrato se refere ao custo dos profissionais necessários para que a testagem ocorra naquele posto. Para estabelecer os custos de cada contrato, consideramos o piso salarial da enfermagem, fixado em R\$ 4.750,00 [Brasil, 2022] por servidor. Cada posto de testagem está associado a apenas um contrato, e cada contrato pode abranger de um até o número máximo de servidores definido durante a execução do modelo. Portanto, os custos de alocação de pessoal variam de R\$ 4.750,00 para postos com um único servidor até R\$ 47.500,00 para postos com 10 servidores, por exemplo. Avaliamos cenários considerando o máximo de 20, 30 e 40 servidores por contrato.

Em relação às demandas, foram considerados dois cenários: baixa demanda e alta demanda. No cenário de baixa demanda, estabelecemos que a demanda por hora de cada bairro seria igual a 0,5% de sua população total, obtida através do último Censo, realizado em 2010. Já para o cenário de alta demanda, aumentamos esse percentual para 1% da população, também com base no Censo de 2010.

No que diz respeito ao tempo de atendimento, consideramos uma média de 2 minutos para cada ação de testagem, como a coleta de uma amostra por meio de um *Swab Nasal*, assumindo que o paciente já tenha passado pelo processo de cadastro anteriormente. Com base nisso, cada profissional é capaz de atender em média 30 pacientes por hora.

Como mencionado anteriormente, o cálculo da capacidade de atendimento é baseado na taxa de atendimento por hora de cada servidor. Também consideramos o tempo máximo de espera, definido neste estudo com os valores de 10, 20 e 30 minutos, o número de servidores e um percentual mínimo que estabelece o limite aceitável para o tempo de espera, representado por  $\alpha$ . Esse parâmetro pode ser considerado como um indicador do nível de serviço, uma vez que um valor mais alto indica uma restrição de espera mais rigorosa a ser cumprida.

É importante ressaltar que, devido às diferentes grandezas dos valores envolvidos (distância em metros e custos em Reais), realizamos uma normalização dos dados antes de incorporá-los ao modelo. Essa abordagem foi adotada para evitar que um dos valores prevalecesse totalmente sobre o outro.

## Capítulo V Experimentos Computacionais

Para realizar os experimentos computacionais, utilizamos um computador com processador Intel(R) Core(TM) i7-4500U CPU @ 1.80GHz, 8GB de memória RAM, SSD e sistema operacional Windows 10 Home. O *solver* utilizado foi o Gurobi 9.5.2, executado em um ambiente Python 3.8.

Os experimentos realizados tiveram como objetivo analisar qual a estratégia mais indicada para a cidade de Niterói no que diz respeito à implantação de um programa de testagem, seguindo as premissas definidas no Capítulo IV.

Conforme mencionado anteriormente, identificamos uma concentração significativa de instalações de saúde próximas ao centro da cidade, com poucas opções ao se afastar dessa região central. Portanto, decidimos incluir uma segunda investigação no planejamento inicial, adicionando novos locais candidatos, como praças, escolas e instalações esportivas. Esses locais adicionais, denominados “candidatos secundários”, exigem um custo de abertura, ao contrário das instalações de saúde já existentes, pois requerem preparação e infraestrutura antes de iniciarem as operações. No entanto, esses candidatos secundários podem contribuir para a redução do deslocamento, ampliando a oferta de locais candidatos nas regiões mais distantes do centro da cidade. Para os experimentos, estabelecemos custos de abertura na faixa de R\$ 5.000,00 a R\$ 25.000,00. A Figura V.1 ilustra a localização dos locais candidatos primários em vermelho e dos candidatos secundários em verde no mapa da cidade de Niterói.

Outra questão abordada neste estudo é a eficácia de restringir o atendimento de uma facilidade de testagem apenas aos bairros localizados na mesma região administrativa. Essa medida tem como objetivo reduzir a distância percorrida por um paciente para realizar o teste.

Com a inclusão destes dois novos cenários às possibilidades definidas anteriormente, chegamos ao total de 15 valores divididos em 6 parâmetros distintos, detalhados na Tabela V.1. Logo, um total de 216 variações de parâmetros foram experimentadas, e seus resultados basearam as análises a seguir.

Nível de Serviço	Com Candidatos Secundários?	Tempo de Espera (min.)	Níveis de Demanda	Restrição por Região?	Nº Máximo de Servidores p/ Contrato
85%	Sim	10	Baixa Demanda	Sim	20
90%	Não	20	Alta Demanda	Não	30
95%		30			40

Tabela V.1: Parâmetros utilizados na execução dos experimentos computacionais.

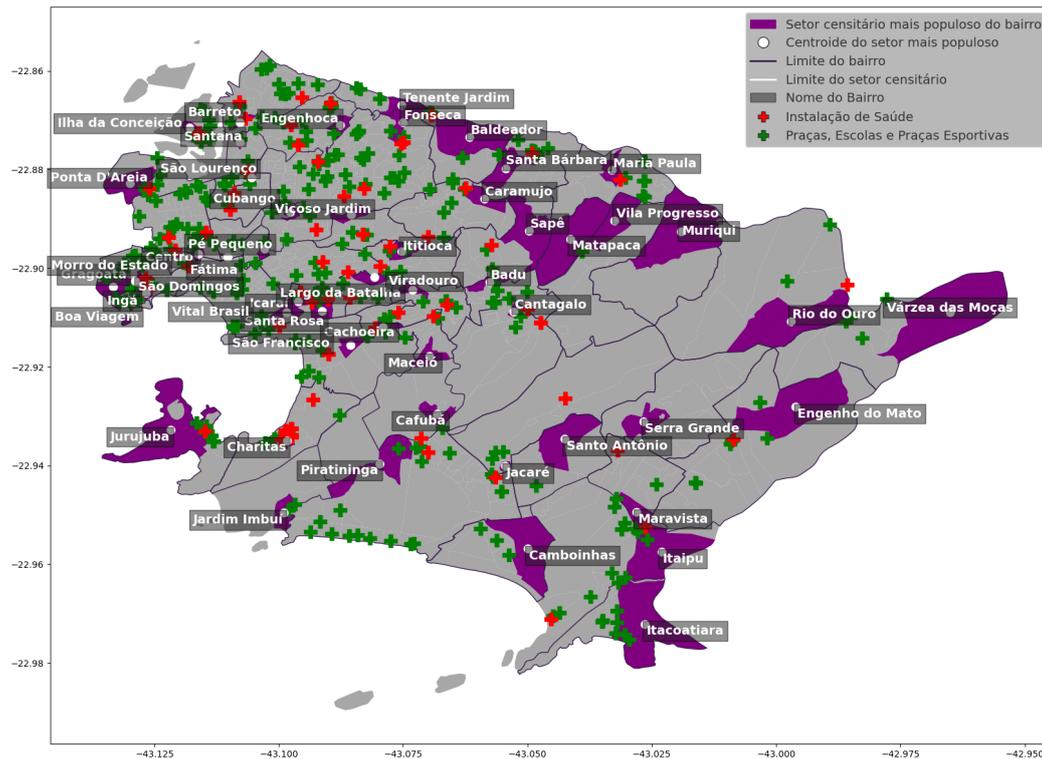


Figura V.1: Locais candidatos a receber postos de teste exibidos no mapa da cidade de Niterói. Os ícones vermelhos demarcam os candidatos primários (equipamentos de saúde) e os ícones verdes referem-se aos candidatos secundários (praças, escolas e instalações esportivas). Além disso, os centroides populacionais de cada bairro, com seu respectivo setor censitário, são destacados. - Fonte: Os próprios autores, com dados da Prefeitura de Niterói e IBGE.

## V.1 A importância do Correto Dimensionamento da Demanda

Em uma situação de baixa demanda, todos os cenários propostos puderam ser avaliados corretamente, satisfazendo todas as restrições do modelo. Contudo, em alta demanda, nenhuma execução com o limite de 20 servidores por contrato pôde satisfazer todas as restrições definidas pelo modelo proposto, tornando inviável encontrar uma solução. Isto se deu pela imposição de que um bairro só poderia ser atendido por apenas um posto de teste. Com a referida combinação de parâmetros, o bairro mais populoso de Niterói, Icaraí, com 78.715 habitantes e demanda de 787 pacientes por hora, não pôde ser atendido por apenas um posto, mesmo no cenário de menor nível de serviço. A capacidade máxima de atendimento por hora de um posto com 20 servidores, nestas condições, é de 596 pacientes, uma diferença de 191 pacientes para a demanda de Icaraí. Cabe ressaltar que este foi o único bairro a violar esta restrição do modelo, estando os demais bairros dentro dos limites de atendimento especificados anteriormente. A Figura V.2 ilustra esta situação, através do mapa demográfico do município de Niterói, de acordo com o último Censo.

Uma abordagem que pode ser utilizada neste caso, também podendo se aplicar à utilização deste modelo em cidades maiores, em que problemas como este podem surgir em mais bairros com

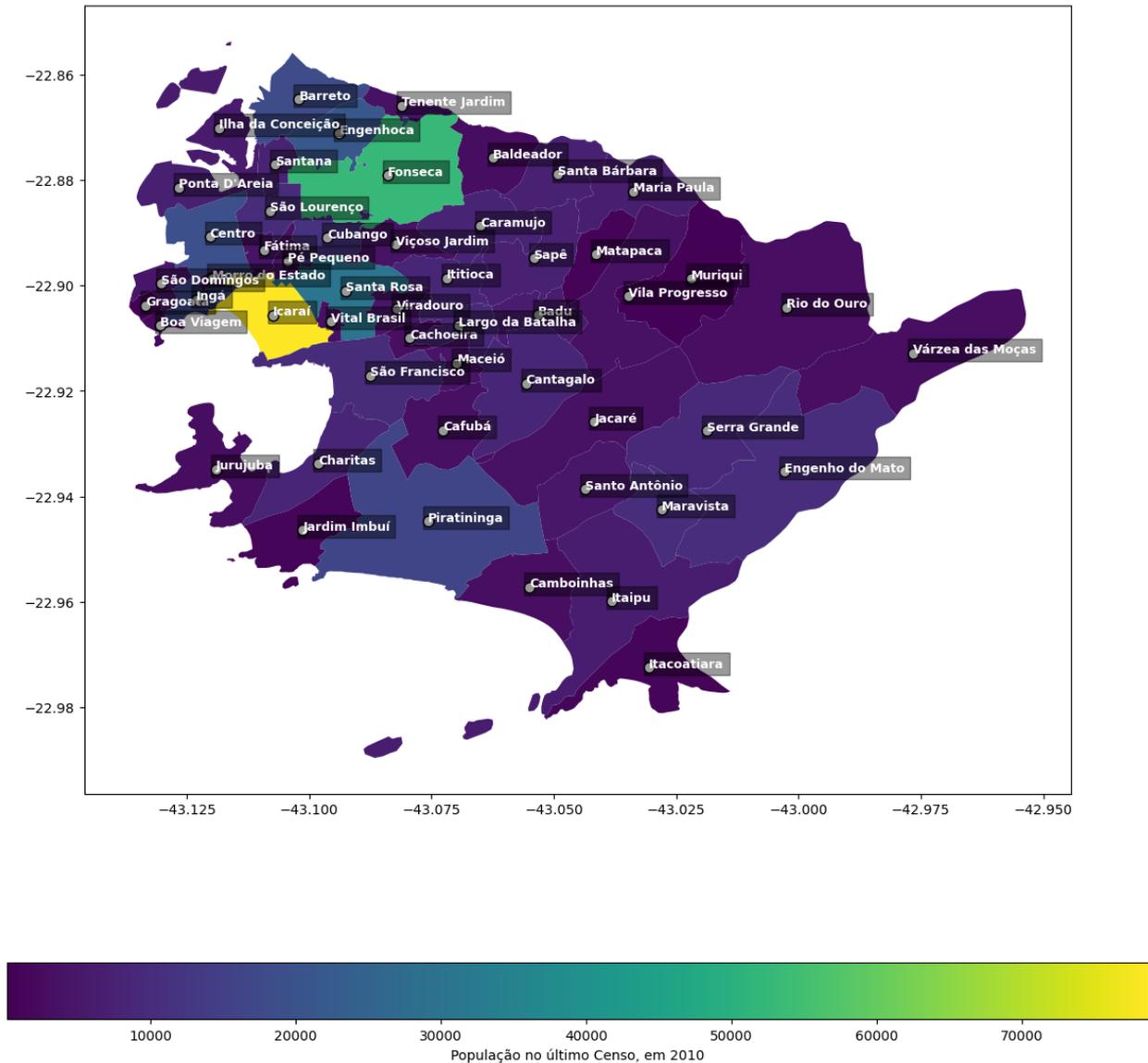


Figura V.2: Mapa demográfico da cidade de Niterói, que mostra o bairro Icarai como o mais populoso, com mais de 70 mil habitantes, seguido pelos bairros Fonseca e Santa Rosa, na casa dos 50 e 40 mil habitantes, respectivamente. Fonte: IBGE - Censo 2010.

população elevada, é a subdivisão destes em “sub-bairros”, como já acontece, formal ou informalmente, em diversas cidades. Esta abordagem foi utilizada neste trabalho, dividindo o bairro Icarai em dois, denominados “Icarai Norte” e “Icarai Sul”, com populações semelhantes, próximas a 40 mil habitantes. Esta divisão permitiu que, em cenários com no máximo 20 servidores por contrato, o modelo pudesse ter todas as suas restrições satisfeitas. Para as análises posteriores, esta será a divisão municipal utilizada.

## V.2 Baixa Demanda x Alta Demanda

Em ambos cenários observamos uma redução gradual e inversamente proporcional ao limite de servidores nos contratos, com destaque para a diminuição mais acentuada no cenário de alta

demanda, quando o número máximo de servidores passou de 20 para 30. Em média, foram abertas 10,50 facilidades quando os contratos foram limitados a 20 servidores, 7,25 facilidades quando a limitação foi de 30 servidores, e 6,25 facilidades quando o limite de servidores foi aumentado para 40, conforme mostrado na Figura V.3. Esse fenômeno pode ser explicado pelo fato de que, em baixa demanda, são alocados poucos servidores em cada facilidade, enquanto em um cenário de alta demanda, a maioria dos contratos vinculados às facilidades possui um número elevado de servidores, próximo ao limite imposto. Assim, a pressão para aumentar a capacidade de atendimento afeta diretamente a contratação de novos servidores, não afetando no mesmo grau o número de facilidades abertas. Esse comportamento é ilustrado na Figura V.4. Conseqüentemente, há uma variação significativa nos custos entre os dois cenários, atingindo uma média de R\$ 800.000,00 no cenário de alta demanda, em comparação com uma média de R\$ 405.000,00 no cenário de baixa demanda. Isso ocorre devido ao alto número de servidores contratados. É importante ressaltar que não houve variação significativa no tempo máximo de espera em nenhum dos cenários, com uma diferença máxima de quatro servidores adicionais contratados entre um cenário de 10 minutos de espera e um cenário de 30 minutos, considerando o mesmo nível de serviço.

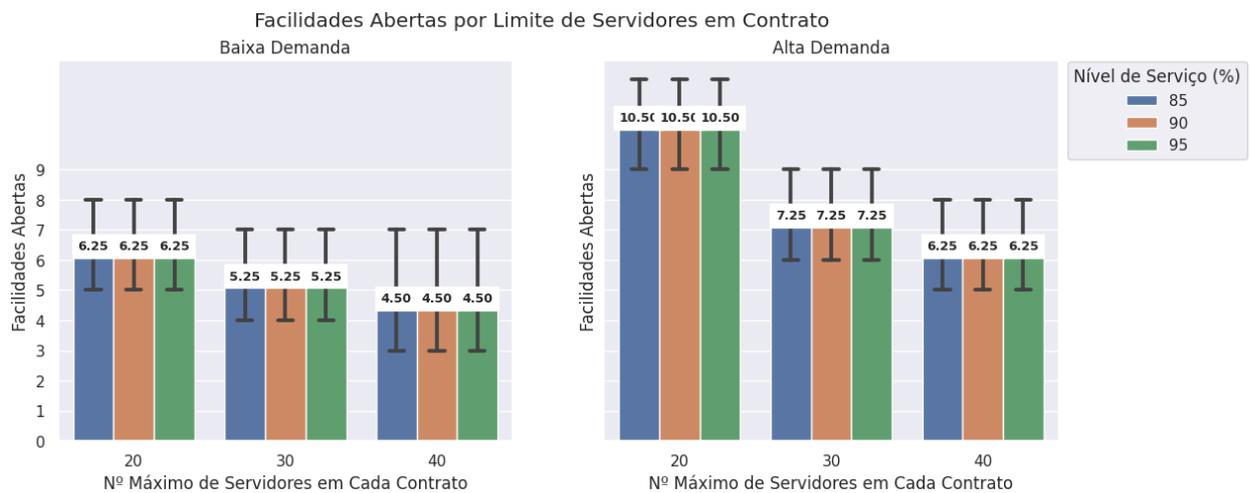


Figura V.3: Quantidade média de facilidades abertas em baixa e alta demanda, com relação à limitação do número de servidores por contrato. Em ambos cenários houve diminuição progressiva do número de facilidades, ao aumentar o número máximo de servidores por contrato. Fonte: Os próprios autores.

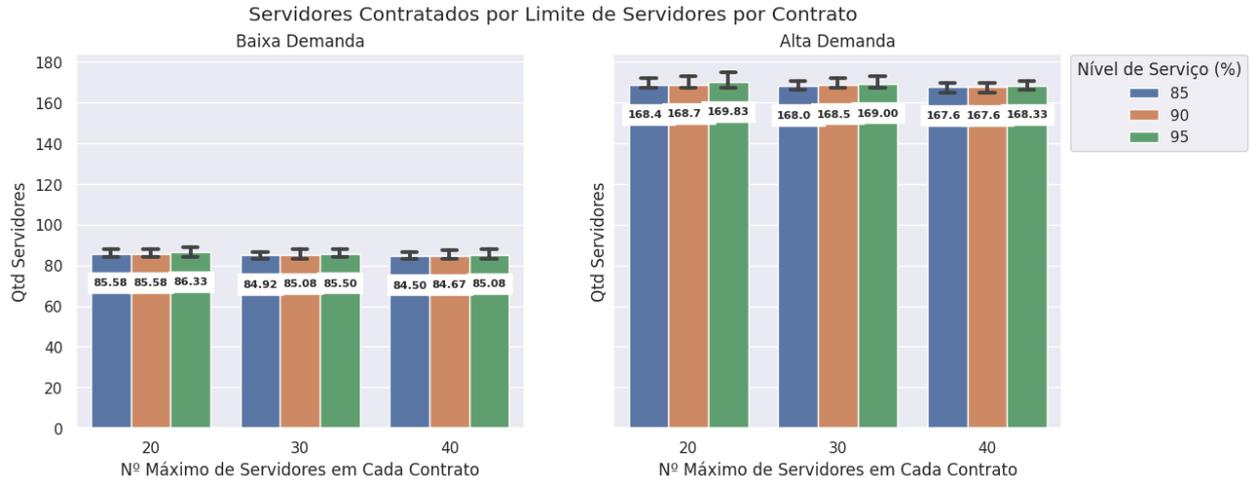


Figura V.4: Quantidade média de servidores contratados em baixa e alta demanda, com relação à limitação do número de servidores por contrato, com estabilidade em ambos cenários. Fonte: Os próprios autores.

### V.3 Livre Escolha x Restrição Regional

Conforme previsto, a implementação de uma restrição regional, em que os bairros só podem ser atendidos por facilidades localizadas na mesma região administrativa, resultou em um aumento no número de facilidades a serem abertas. Isso ocorre porque é necessário ter pelo menos uma facilidade aberta por região administrativa, enquanto no cenário sem restrições uma facilidade poderia atender bairros de diferentes regiões. No cenário de alta demanda, por exemplo, foram necessárias aproximadamente 6 facilidades no cenário sem restrições e uma média de 9 facilidades no cenário restrito.

Assim como ocorreu no cenário sem restrição regional, houve um aumento significativo no número de servidores necessários ao compararmos os cenários de baixa e alta demanda. Como explicado anteriormente, esse comportamento é justificado pelo baixo número de servidores contratados por cada facilidade no cenário de baixa demanda, em comparação com o número sempre alto de servidores por contrato quando a demanda é alta.

A implementação da restrição regional resultou em um leve aumento no custo total da operação. No cenário de menor demanda, o custo médio passou de R\$ 399.000,00 para R\$ 411.000,00, representando um aumento de 3,01%. No cenário de maior demanda, o custo médio aumentou de R\$ 794.000,00 para R\$ 806.000,00, ou seja, 1,51%.

No entanto, o principal objetivo da restrição regional, que é reduzir a distância percorrida para buscar testagem, teve um impacto positivo na resolução do problema. Houve uma redução de até 16,51% na distância percorrida, com um aumento máximo de apenas 3,10% no custo, em comparação com o cenário sem restrição.

A Tabela V.2 apresenta essas informações de forma detalhada para cada nível de serviço.

Nível de Serviço	Restrição por Região	Distância Total Percorrida - em Km		Custo Total - em R\$	
		Baixa Demanda	Alta Demanda	Baixa Demanda	Alta Demanda
85%	Não	202,34	168,93	398.470,00	792.460,00
	Sim	169,20 (-16,38%)	146,08 (-13,53%)	409.030,00 (+2,65%)	804.080,00 (+1,47%)
90%	Não	202,43	169,19	398.470,00	794.040,00
	Sim	169,01 (-16,51%)	146,39 (-13,47%)	410.360,00 (+2,98%)	804.860,00 (+1,36%)
95%	Não	202,42	169,84	400.580,00	796.940,00
	Sim	169,24 (-16,39%)	146,52 (-13,73%)	412.990,00 (+3,10%)	809.360,00 (+1,56%)

Tabela V.2: Relação entre as restrições regionais, a distância percorrida e o custo total da operação, em cada cenário. Os resultados mostram que é benéfica a restrição, com uma diminuição de até 16,51% da distância percorrida para um aumento máximo de apenas 3,10% do custo da operação. Fonte: Os próprios autores.

#### V.4 O Impacto do Tempo de Atendimento

Conforme definido anteriormente, todas as análises até o momento consideraram, para o cálculo de capacidade de atendimento, que cada servidor atende em média 30 pacientes por hora, ou seja, um a cada dois minutos. Para avaliar o impacto que o tempo médio de atendimento tem na resolução do modelo, alteramos o tempo de atendimento para três minutos, ou 20 pacientes por hora, em média. Esta mudança impactou significativamente a capacidade de atendimento, indo de 589 para 389, em um cenário com baixo nível de serviço, 85%, e 20 servidores em um contrato, por exemplo. Por consequência, houve um ligeiro aumento no número de facilidades abertas, uma unidade, e um aumento substancial no número de servidores contratados, de 85 para 128, ou 50,59%, neste recorte específico, como mostra a Figura V.5. Cabe destacar que este experimento foi realizado em um cenário de baixa demanda.

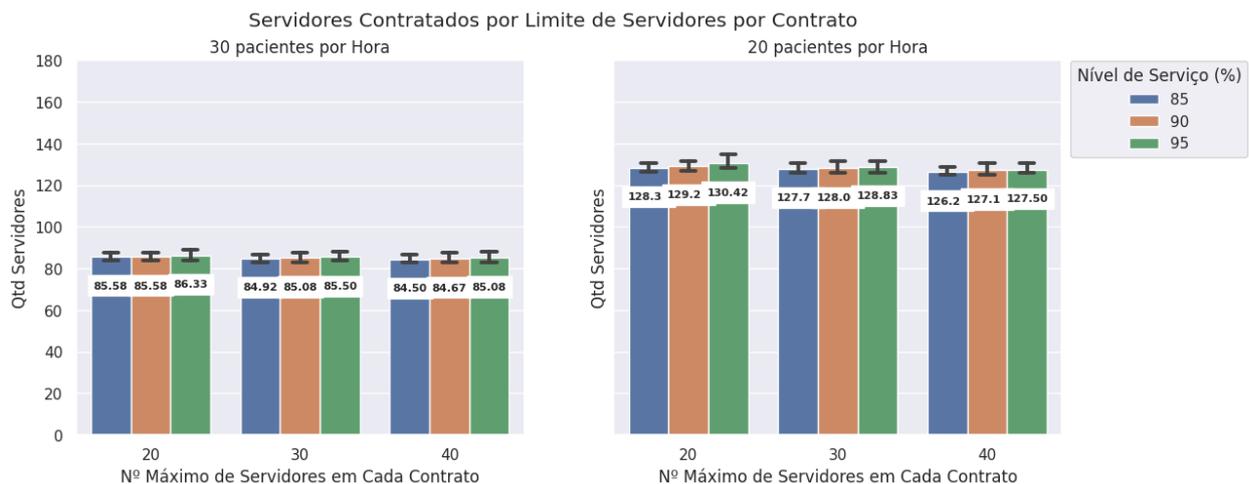


Figura V.5: Quantidade média de servidores contratados em cenários de 2 e 3 minutos por atendimento, com relação à limitação do número de servidores por contrato. O nível de serviço não afeta o número de servidores contratados. Porém, o aumento de um minuto no tempo de atendimento impacta significativamente o número de servidores contratados. Fonte: Os próprios autores.

## V.5 O Impacto da Distância Real

Um dos pontos propostos neste trabalho foi a utilização da malha rodoviária real do município de Niterói para o cálculo das distâncias entre o centroide populacional de cada bairro e os locais candidatos a receber um posto de testagem. Esta abordagem visava trazer maior precisão para a distância percorrida por um cidadão em busca de um teste, em comparação com cálculos que levam em conta uma distância aproximada. Para validar esta abordagem, executamos o modelo duas vezes com o mesmo conjunto de parâmetros, porém em uma das execuções o cálculo da distância foi substituído, do padrão utilizado neste trabalho para um cálculo aproximado, utilizando a fórmula de Haversine. Posteriormente, a distância real, com base na malha rodoviária, foi calculada para o resultado encontrado na execução que utilizou a fórmula de Haversine. O conjunto de parâmetros escolhido para a avaliação está detalhado na Tabela V.3. Tanto no cenário de restrição regional quanto no cenário de livre escolha, este experimento mostrou que o uso da malha rodoviária real é benéfica. Houve diminuição de 20 quilômetros na distância total percorrida, para o cenário restrito, e 32 quilômetros no cenário de livre escolha, ambos mantendo o custo total da operação.

Nível de Serviço	Com Candidatos Secundários?	Tempo de Espera (min.)	Níveis de Demanda	Restrição por Região?	Nº Máximo de Servidores p/ Contrato
95%	Sim	10	Alta Demanda	Sim Não	20

Tabela V.3: Parâmetros utilizados na execução dos experimentos do cálculo de distância real x fórmula de Haversine.

## V.6 Candidatos Secundários

Embora os locais candidatos secundários tenham sido considerados como uma opção para reduzir o deslocamento em áreas mais distantes do centro da cidade, o modelo não identificou vantagens em utilizá-los em nenhuma das soluções. Em vez disso, optou-se apenas pelas instalações de saúde já existentes no município. Esse fato provavelmente se deve ao custo inicial associado a esses locais, juntamente com o custo de contratação de pessoal, o que torna essa opção mais dispendiosa do que adicionar um testador a um posto já existente, mesmo que isso resulte em um deslocamento um pouco maior.

## V.7 Exibição dos Resultados

Para exibir o resultado, uma representação visual através de um mapa e uma lista foi criada, mostrando quais facilidades foram selecionadas e quais bairros cada uma delas atende, além da capacidade em uso de cada uma delas. A Figura V.6 mostra um exemplo deste mapa. Já a Figura

V.7 exhibe a respectiva lista de resultados. Estes dados são gerados em um único arquivo de imagem, porém estão sendo exibidos aqui de forma separada visando melhor legibilidade.

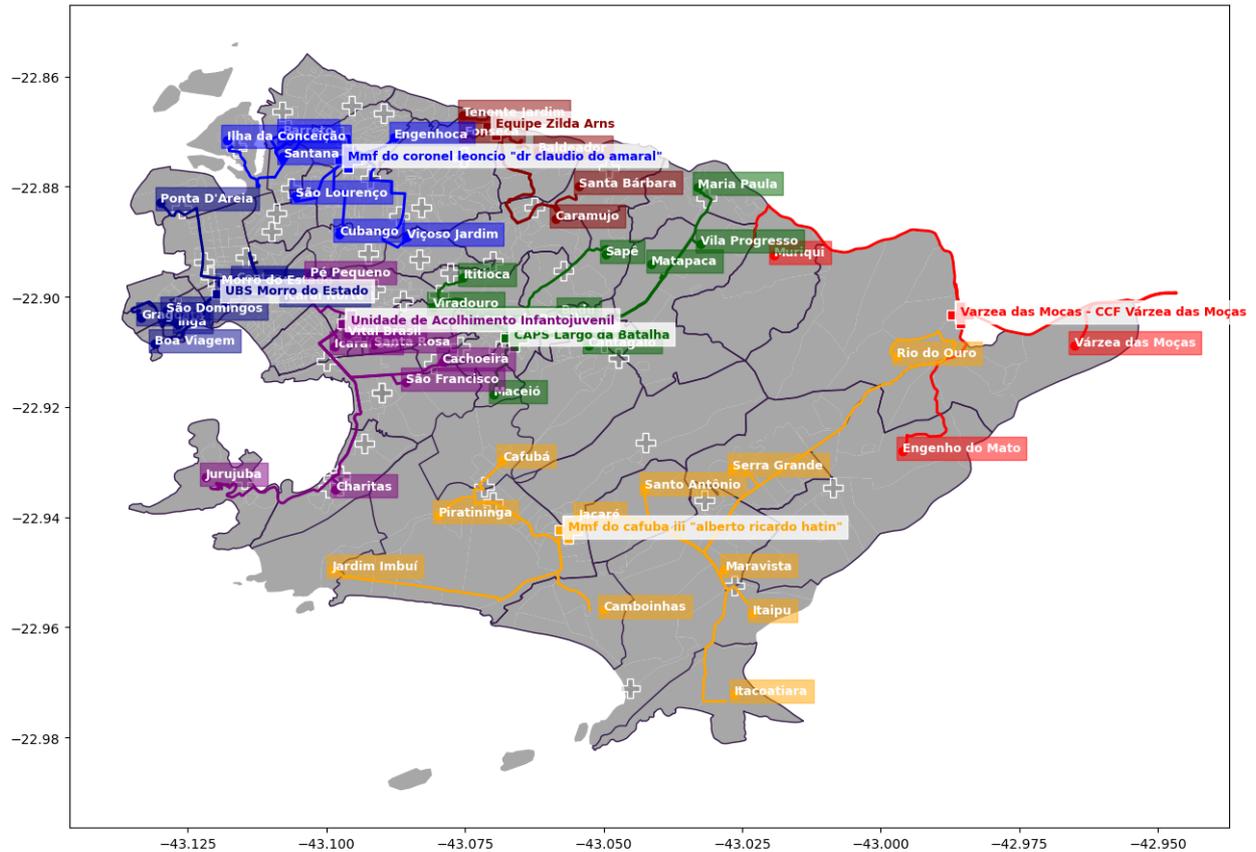


Figura V.6: Mapa com os resultados encontrados pelo modelo. Cada facilidade recebe uma cor distinta, que é repassada a todos os bairros por ela atendida. Neste exemplo, o modelo foi executado com a restrição regional. Sete facilidades foram selecionadas para o atendimento à população. Fonte: Os próprios autores.

- Varzea das Mocas - CCF Várzea das Moças - 3 bairros  
3 servidores | Custo: 14250 | Capacidade: 85.0 | Demanda: 70 (82.35%)  
  
Engenho do Mato (51)  
Muriqui (4)  
Várzea das Moças (15)
- UBS Morro do Estado - 9 bairros  
17 servidores | Custo: 80750 | Capacidade: 504.0 | Demanda: 502 (99.6%)  
  
Boa Viagem (11)  
Centro (97)  
Fátima (21)  
Gragoatá (1)  
Icaraí Norte (205)  
Ingá (87)  
Morro do Estado (21)  
Ponta D'Areia (35)  
São Domingos (24)
- CAPS Largo da Batalha - 10 bairros  
11 servidores | Custo: 52250 | Capacidade: 325.0 | Demanda: 304 (93.54%)  
  
Badu (31)  
Cantagalo (43)  
Ititioica (43)  
Largo da Batalha (47)  
Maceió (22)  
Maria Paula (34)  
Matapaca (6)  
Sapê (36)  
Vila Progresso (19)  
Viradouro (23)
- Equipe Zilda Arns - 5 bairros  
13 servidores | Custo: 61750 | Capacidade: 384.0 | Demanda: 376 (97.92%)  
  
Baldeador (15)  
Caramujo (40)  
Fonseca (264)  
Santa Bárbara (38)  
Tenente Jardim (19)
- MMF DO CAFUBA III "ALBERTO RICARDO HATIN" - 11 bairros  
11 servidores | Custo: 52250 | Capacidade: 325.0 | Demanda: 315 (96.92%)  
  
Camboinhas (16)  
Cafubá (17)  
Itacoatiara (7)  
Itaipu (32)  
Jacaré (18)  
Jardim Imbuí (6)  
Maravista (51)  
Piratininga (81)  
Rio do Ouro (16)  
Santo Antônio (24)  
Serra Grande (47)
- MMF DO CORONEL LEONCIO "DR CLAUDIO DO AMARAL" - 7 bairros  
14 servidores | Custo: 66500 | Capacidade: 414.0 | Demanda: 393 (94.93%)  
  
Barreto (91)  
Cubango (57)  
Engenhoca (107)  
Ilha da Conceição (29)  
Santana (39)  
São Lourenço (49)  
Viçoso Jardim (21)
- Unidade de Acolhimento Infantojuvenil - 8 bairros  
17 servidores | Custo: 80750 | Capacidade: 504.0 | Demanda: 502 (99.6%)  
  
Cachoeira (16)  
Charitas (41)  
Icaraí Sul (190)  
Jurujuba (14)  
Pé Pequeno (21)  
Santa Rosa (154)  
São Francisco (49)  
Vital Brasil (17)

Figura V.7: Lista de resultados relativos ao mapa exibido na Figura V.6. Cada facilidade selecionada traz a lista de bairros que atende, sua capacidade de atendimento e uso atual. Fonte: Os próprios autores.

## Capítulo VI Conclusões

Este trabalho apresentou um modelo de programação linear inteira para o problema de localização de postos de testagem, e realizou um estudo de caso utilizando dados do município de Niterói, localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro. O modelo proposto considerou não apenas os elementos comuns à localização de facilidades, como a minimização da distância entre os atendidos e os centros de atendimento, mas também levou em consideração o tempo até o atendimento, após a chegada do paciente a um posto de testagem. Essa consideração do tempo de atendimento é de extrema importância, especialmente em postos de testagem, onde há uma alta probabilidade de encontrar pessoas infectadas, aumentando o risco de contágio para aqueles que suspeitam estar infectados, mas não estão. Com base nos experimentos realizados, concluímos que, em bairros de maior população e conseqüentemente maior demanda, pode ser necessária a subdivisão do território para contemplar o seu atendimento de forma satisfatória em relação às restrições impostas. Também foi possível afirmar que é primordial utilizar a estrutura de saúde existente no combate a doenças contagiosas, em detrimento à criação de novas instalações. Além disso, dividir o atendimento por zona administrativa é vantajoso, pois reduz significativamente a distância percorrida, com um impacto relativamente baixo no custo operacional. Em situações com restrições de deslocamento, como durante a pandemia de COVID-19, essa abordagem se torna ainda mais relevante. A utilização de locais secundários para atender áreas mais remotas pode ser considerada dentro dessa abordagem, desde que a redução da distância percorrida seja priorizada em relação ao custo, ao invés de buscar um equilíbrio entre os dois. Outra abordagem que se mostrou benéfica foi a utilização da malha rodoviária real, que provocou a diminuição da distância total percorrida, em comparação com a utilização de um método aproximado, como Haversine. Este estudo também pôde comprovar o quanto é importante o correto dimensionamento do tempo de atendimento para o sucesso da operação de testagem. Uma diferença de um minuto no tempo médio de atendimento levou a um aumento considerável de servidores necessários para atender à demanda de forma satisfatória.

Como sugestão para trabalhos futuros, propomos abordar esse problema de forma multiobjetiva, analisando cada um dos cenários mencionados. Além disso, uma abordagem interessante seria incluir filas de prioridade no atendimento e investigar seu impacto na resolução do problema.

## Referências

- Ahmadi-Javid, A., Seyedi, P., and Syam, S. S. A survey of healthcare facility location. *Computers and Operations Research*, 79:223–263, 2017.
- Akwafuo, S. E., Mikler, A. R., and Ihinegbu, C. Geo-clustering model for optimizing locations of public health emergency operations and covid-19 vaccine distribution centers. pages 1108–1113. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2022.
- Barbosa, M. A. and Zanardini, R. A. D. *Pesquisa operacional: uma visão geral*. Intersaberes, Curitiba, 3 edition, 2015.
- Bertsimas, D. and Tsitsiklis, J. *Introduction to linear optimization*. Athena Scientific, 1997.
- Bonita, R., Beaglehole, R., and Kjellström, T. *Epidemiologia Básica 2<sup>a</sup> edição*. 2<sup>a</sup> edition, 2010.
- Brasil. *Plano Nacional de Expansão da Testagem para Covid-19*. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde, 2021.
- Brasil. Lei n<sup>o</sup> 14.434, de 04 de agosto de 2022, 2022.
- Cabanilla, K. I., Enriquez, E. A. T., Velasco, A. C., Mendoza, V. M. P., and Mendoza, R. Optimal selection of covid-19 vaccination sites in the philippines at the municipal level. *PeerJ*, 10, 2022.
- Carter, M., Price, C., and Rabadi, G. *Operations Research: A Practical Introduction*. Advances in Applied Mathematics. CRC Press, 2019.
- Christensen, T. R. L. and Klose, A. A fast exact method for the capacitated facility location problem with differentiable convex production costs. *European Journal of Operational Research*, 292:855–868, 2021.
- Church, R. L. and Reville, C. S. The maximal covering location problem. *Papers of the Regional Science Association*, 32:101–118, 1974.
- Delgado, E. J., Cabezas, X., Martin-Barreiro, C., Leiva, V., and Rojas, F. An equity-based optimization model to solve the location problem for healthcare centers applied to hospital beds and covid-19 vaccination. *Mathematics*, 10, 2022.

- Fogliatti, M. C. and Mattos, N. M. C. *Teoria das Filas*. Interciência, Rio de Janeiro, 1 edition, 2007.
- Galvão, R. D. Uncapacitated facility location problems contributions. *Pesquisa Operacional*, 24:7–38, 2004.
- Hakimi, S. L. Optimum locations of switching centers and the absolute centers and medians of a graph. *Operations Research*, 12(3):450–459, 1964.
- Hassan, S. A., Alnowibet, K., Agrawal, P., and Mohamed, A. W. Optimum location of field hospitals for covid-19: A nonlinear binary metaheuristic algorithm. *Computers, Materials and Continua*, 68:1183–1202, 2021.
- Kendall, D. G. Stochastic Processes Occurring in the Theory of Queues and their Analysis by the Method of the Imbedded Markov Chain. *The Annals of Mathematical Statistics*, 24(3):338 – 354, 1953.
- Kuehn, A. A. and Hamburger, M. J. A heuristic program for locating warehouses. *Management Science*, 9(4):643–666, 1963.
- Li, Y., Wen, X., Choi, T. M., and Chung, S. H. Optimal establishments of massive testing programs to combat covid-19: A perspective of parallel-machine scheduling-location (scheloc) problem. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2022.
- Liu, K., Liu, C., Xiang, X., and Tian, Z. Testing facility location and dynamic capacity planning for pandemics with demand uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 304:150–168, 2023.
- Marianov, V., Rios, M., and Barros, F. J. Allocating servers to facilities, when demand is elastic to travel and waiting times. *RAIRO - Operations Research*, 39:143–162, 2005.
- Marianov, V. and Serra, D. Location-allocation of multiple-server service centers with constrained queues or waiting times, 2002.
- OMS. Dashboard Covid-19. <https://covid19.who.int>, 2022.
- OMS. Advice for the public: Coronavirus disease (covid-19). <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-for-public>, 2023.
- OPAS. Histórico da Pandemia de Covid-19. <https://www.paho.org/pt/covid19/historico-da-pandemia-covid-19>, 2022.

- Pereira, M. A., Coelho, L. C., Lorena, L. A., and Souza, L. C. D. A hybrid method for the probabilistic maximal covering location-allocation problem. *Computers and Operations Research*, 57:51–59, 2015.
- Risanger, S., Singh, B., Morton, D., and Meyers, L. A. Selecting pharmacies for covid-19 testing to ensure access. *Health Care Management Science*, 24:330–338, 2021.
- Shortle, J., Thompson, J., Gross, D., and Harris, C. *Fundamentals of Queueing Theory*. Wiley Series in Probability and Statistics. Wiley, 2018.
- Taha, H. A. *Pesquisa operacional: uma visão geral*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2008.
- Tavakkoli-Moghaddam, R., Vazifeh-Noshafagh, S., Taleizadeh, A. A., Hajipour, V., and Mahmoudi, A. Pricing and location decisions in multi-objective facility location problem with m/m/m/k queuing systems. *Engineering Optimization*, 49:136–160, 2017.
- Wolfinger, D., Gansterer, M., Doerner, K. F., and Popper, N. A large neighbourhood search metaheuristic for the contagious disease testing problem. *European Journal of Operational Research*, 2021.